

**MANUALUL
INGINERULUI
ELECTRICIAN**

III

EDITURA TEHNICĂ

242
1954

MANUALUL INGINERULUI ELECTRICIAN

III

CURENTUL CONTINUU



EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI, 1956

COLECTIVUL DE ELABORARE

SECȚIUNEA IV — CURENTUL CONTINUU

I. PILE ȘI ACUMULATOARE

ING. L. FIHMAN

II. MUTATOARE

PROF. ING. CHR. VAZACA (subcapitolele A — M)

CONF. FL. CIORĂSCU și ING. I. PURICA (subcapitol N)

PROF. DR. ING. GH. PETRESCU (subcapitol O)

COORDONARE

ING. PAUL BUNESCU și ING. PAUL CARTIANU

TABLA DE MATERII

I. Pile și acumulatori

A. Generalități	1	27. Rezistența internă totală a elementelor galvanice (26). 28. Capacitatea în Ah și energia înmagazinată în Wh a elementelor galvanice (28). 29. Puterea elementelor galvanice (29). 30. Realizarea f.e.m. maxime (29). 31. Capacitatea maximă (31). 32. Coeficientul de utilizare a maselor active (31). 33. Randamentul elementelor galvanice secundare (32). 34. Autodescărcarea (32). 35. Durata în serviciu (32). 36. Condițiile impuse surselor electrochimice (32).
B. Teoria surselor electrochimice	7	D. Elemente galvanice primare (pile)
1. Principiul de funcționare (1). 2. Sistemul electrochimic și masele active (2). 3. Clasificarea și notarea surselor electrochimice (2). 4. Termenii și notarea în reacțiile electrochimice (3).		37. Pila Volta sau pila elementară (33). 38. Depolarizarea (33). 39. Elemente galvanice cu depolarizant lichid (34). 40. Elemente galvanice cu depolarizant solid (37). 41. Elemente galvanice cu depolarizant gazos (39). 42. Elemente galvanice cu depolarizare mixtă (40). 43. Elemente etalon (normale) (41). 44. Elemente galvanice industriale de serii mari (42). 45. Elemente umede (elemente sac) (43). 46. Elemente uscate (43). 47. Caracteristicile electrice ale elementelor D.M., D.O. și D.M.O. (45). 48. Extras din STAS 808-49 și 809-49 (52). 49. Metode de încercare (STAS 808-49 și 809-49) (52). 50. Execuții speciale ale elementelor uscate D.M., D.O. și D.M.O. (53). 51. Construcții noi de elemente galvanice primare (54).
5. Procesul transformărilor energetice (7). 6. Reacțiile ionice în sursele electrochimice de energie electrică (8). 7. Clasificarea electrozilor întrebunțați în sursele electrochimice (10). 8. Combinarea electrozilor de diferite ordine în sisteme electrochimice (elemente sau pile galvanice) (12). 9. Pila constituită din electrozi de ordinul 1: două metale diferite, fiecare cufundat într-o soluție a sării sale (12). 10. Pila constituită din electrozi de ordinul 2 (14). 11. Pila constituită din electrozi de ordinul 3 (de oxidare-reducere) (14). 12. Potențiale de contact lichid și pile de concentrație (14). 13. Elemente reversibile și elemente nereversibile (15).		E. Elemente galvanice secundare
C. Caracteristicile electrice și electrochimice principale	16	a) Acumulatori electrice cu plăci de plumb 55
14. Forța electromotoare (15). 15. Metode de măsurare a potențialelor de electrod (15). 16. Electrozi de referință (16). 17. Potențialul normal (standard) de electrod (17). 18. Șirul potențialelor normale de electrod (17). 19. Calculul termochimic al f.e.m. (18). 20. Tensiunea la bornele sursei electrochimice (20). 21. Curbele caracteristice de descărcare și încărcare (21). 22. Funcționarea sursei electrochimice în regim de acumulator (21). 23. Succesiunea proceselor la electrozi (22). 24. Polarizarea. (22). 25. Supratensiunea hidrogenului (24). 26. Supratensiunea oxigenului (25).		52. Clasificare (55). 53. Sistemul electrochimic și principiul de funcționare (56). 54. Procesele electrochimice în acumulatorul cu plăci de plumb (57). 55. F.e.m. a acumulatorului cu plăci de plumb (58). 56. Rezistența acumulatorului cu plăci de plumb (62). 57. Caracte-

risticele $U = f(t)$ la descărcarea și la încărcarea acumulatorului cu plăci de plumb (65). 58. Capacitatea acumulatorilor cu plăci de plumb (67). 59. Durata în serviciu a plăcilor (69). 60. Randamentul acumulatorului cu plăci de plumb (69). 61. Autodescărcarea acumulatorilor de plumb (70). 62. Sulfurarea acumulatorilor în stare de repaus (70). 63. Construcția electrozilor acumulatorilor de plumb (70). 64. Fabricarea acumulatorilor de plumb cu plăci pastate (71). 65. Fabricarea acumulatorilor staționare cu plăci de plumb (75). 66. Separatoarele acumulatorilor de plumb (76). 67. Electroliții acumulatorilor cu plăci de plumb (77). 68. Plumbul, antimonul și oxizii de plumb întrebuințați în acumulatori (77). 69. Vascele de acumulatori (77). 70. Încărcarea acumulatorilor (77). 71. Procedeele de încărcare a bateriilor de acumulatori (79). 72. Punerea în funcțiune a bateriei (83). 73. Reguli generale pentru întreținerea acumulatorilor cu plăci de plumb (83). 74. Standarde de stat în vigoare (83). 75. Instrucțiuni generale pentru instalații staționare de baterii de acumulatori cu plăci de plumb (83). 76. Protecția muncii în fabricile de acumulatori cu plăci de plumb (85).

b) *Acumulatorii alcalini* 86

77. Clasificare (86). 78. Sistemul electrochimic

și principiul de funcționare (86). 79. Procesele electrochimice în acumulatorii alcalini (87). 80. T.e.m. a acumulatorilor alcalini (88). 81. Rezistența internă a acumulatorilor alcalini (88). 82. Caracteristicile $U = f(t)$ la descărcare și la încărcare (89). 83. Capacitatea acumulatorilor alcalini (90). 84. Durata în serviciu (91). 85. Randamentul acumulatorilor alcalini (91). 86. Autodescărcarea acumulatorilor alcalini (91). 87. Construcția electrozilor și fabricarea acumulatorilor alcalini (91). 88. Electroliții acumulatorilor alcalini (94). 89. Încărcarea acumulatorilor alcalini (96). 90. Reguli generale de întreținere a acumulatorilor alcalini (97).

c) *Comparație între acumulatorii cu plăci de plumb și cele alcaline și alegerea lor* 97

91. Comparație între acumulatorii cu plăci de plumb și cele alcaline (97). 92. Alegerea tipului de acumulator (99).

d) *Principalele tipuri de acumulatori cu plăci de plumb fabricate în R.P.R.* 100

93. Acumulatori pentru telecomunicații laboratoare și iluminat de siguranță (100). 94. Acumulatorii cu plăci de plumb pentru automobile și motoarele (103). 95. Acumulatori staționare (105). 96. Acumulatori pentru tracțiune și iluminatul trenurilor (111).

II. Mutatoare

A. Generalități 117

1. Definiții și clasificare (117). 2. Tipuri de elemente redresoare (118).

Mutatoare ionice și electronice

B. *Diodă cu vid înaltat (Kenotroane)* 119

3. Descriere generală (119). 4. Emisia termionică a electronilor (119). 5. Acțiunea de redresare a diodei (123). 6. Determinarea experimentală a caracteristicilor statice a diodei (124). 7. Câmpul electric la suprafața catodului (124). 8. Emația sarcinii spațiale (125). 9. Nepotriviri între datele teoretice și cele experimentale (126). 10. Puterea nominală a diodelor cu vid (126). 11. Caracteristicile dinamice a diodei (128).

C. *Diodă cu gaz (gazotroane)* 130

12. Efectul gazului într-o diodă termio-

nică (130). 13. Diodă cu gaz și cu catod termionic (131). 14. Distribuția potențialului într-o diodă cu gaz (131). 15. Dezintegrarea catodului prin bombardamentul ionilor pozitivi (133). 16. Randamentul de emisie al catodului (133). 17. Efectul presiunii gazului asupra caracteristicilor diodei cu gaz (134).

D. *Triodă cu gaz (tiratroane)* 137

18. Efectul gazului într-o triodă termionică cu vid înaltat (137). 19. Efectul gazului într-un tiratron (140). 20. Caracteristicile de comandă ale tiratronului (142). 21. Acțiunea grilei după aprinderea tubului (142). 22. Timpul de ionizare și de delonizare (144). 23. Construcția grilelor tiratronelor (144). 24. Efectele presiunii gazului

asupra caracteristicilor tiratronului (145). 25. Comanda pe grilă a tiratronelor (145).

E. *Date tehnice privind tuburile cu gaz* 152

26. Datele nominale ale tuburilor cu gaz (152). 27. Precauții speciale în cazul utilizării tuburilor cu gaz (154).

F. *Tuburi redresoare cu arcuri de mercur (cu catod din mercur)* 164

28. Fenomene generale (164)

a) *Redresoare polianodice cu arc de mercur* 168

29. Generalități (168). 30. Redresoare în recipienti de sticlă (167). 31. Redresoare în recipienti metalici (169). 32. Instalații și dispozitive anexe (165). 33. Mijloacele pentru etanșarea cuvelor metalice (168). 34. Răcirea redresoarelor cu arc de mercur (169). 35. Redresoare fără pompe de vid (171). 36. Dispozitive de comandă a grilelor (174).

b) *Redresoare monoanodice cu arc de mercur* 178

37. Descriere generală (178). 38. Ignitronul (178). 39. Date nominale pentru ignitronurile aparatelor de sudură (183). 40. Ignitronul pompat (185). 41. Excitronul (187).

c) *Circuite pentru aprinderea sau amor-*
sarea ignitronurilor 189

42. Scheme cu redresor de aprindere (189). 43. Circuite de aprindere cu transformator de impuls și bobină de reacțiune saturată (194). 44. Circuit de aprindere ferorezonant (196). 45. Circuite de aprindere cu condensator (197). 46. Circuite de aprindere pentru ignitronuri în redresoare polifazate (198). 47. Circuite de aprindere pentru ignitronuri, la un comutator sincron (200).

Teoria redresării

G. *Redresoare monofazate* 202

48. Generalități (202). 49. Principiul redresării (202).

a) *Redresoare cu sarcină rezistivă* 207

50. Redresoare cu diode termionice cu vid înaltat (kenotroane) (207). 51. Redresor cu diode termionice cu gaz (215). 52. Alte circuite redresoare monofazate (223).

b) *Redresoare cu sarcină capacitivă (R-C în paralel)* 234

53. Redresoare cu kenotroane (221). 54. Proiectarea filtrelor R-C (232).

c) *Redresoare cu sarcină inductivă (R-L în serie)* 239

55. Redresoare cu kenotroane și gazotroane (239).

d) *Redresoare cu forță contraelectromotoare în circuitul de sarcină* 245

56. Moduri de limitare a curentului (245).

e) *Redresor dublu alternanță cu filtru L-C* 253

57. Tipuri de filtre L-C (253). 58. Filtru cu intrare pe inductanță (255). 59. Filtru cu intrare pe condensator (264).

f) *Alegerea tuburilor redresoare și a circuitelor* 270

60. Criterii pentru alegerea tuburilor și transformatoarelor (270). 61. Criterii pentru alegerea circuitelor (271).

H. *Redresoare monofazate cu tensiune reglabilă* 272

a) *Metode de reglaj* 272

62. Reglarea tensiunii (272).

b) *Teoria redresoarelor monofazate cu electrod de comandă* 275

63. Metode de analiză (275). 64. Redresor monofazat monoalternanță cu sarcină rezistivă (R_s) (275). 65. Redresor monofazat cu sarcină inductivă (R_s-L) (277). 66. Redresor monofazat monoalternanță cu sarcină rezistivă (R_s) și t.e.m. (E) (280). 67. Redresor monofazat monoalternanță cu sarcină inductivă (L) și t.e.m. (E) (282).

I. *Redresoare polifazate* 282

68. Generalități (282)

a) *Teoria fundamentală a redresării polifazate* 283

69. Schema de principiu a redresorului polifazat (283). 70. Ipoteza transformatorului ideal (283). 71. Forma de undă a tensiunii redresate (283). 72. Influența căderilor de tensiune asupra tensiunii redresate (284). 73. Tensiunea medie redresată (284). 74. Coeficientul de redresare (285). 75. Valoarea eficace a tensiunii redresate (285). 76. Mărimile armonice ale tensiunii redresate (285). 77. Avantajele unui număr mare de faze (286). 78. Ipoteza reactorului de inductanță infinită (287). 79. Forma curentilor anodici (287). 80. Valoarea medie a curentului anodic (287). 81. Valoarea eficace

a curentului anodic (287). 82. Puterea aparentă în secundarul transformatorului (288). 83. Factorul de utilizare al secundarului transformatorului (288). 84. Factorul de utilizare al primarului transformatorului (289). 85. Puterea de calcul a transformatorului anodic (289). 86. Avantajele conexiunilor speciale (289). 87. Conexiuni uzuale trifazate și hexafazate (289).

b) Teoria aproximativă a redresorului

polifazat cu transformator real 302
88. Efectul reacției de scăpări a transformatorului (302). 89. Perioada de comutație (302). 90. Scăderea tensiunii redresate în timpul comutației (303). 91. Determinarea unghiului de comutație sau suprapunerii (303). 92. Tensiunea redresată medie în cazul comutației (305). 93. Valoarea eficace a curentului anodic în cazul comutației (306). 94. Recapitularea formulelor privind efectul reacției de scăpări (306). 95. Discuția efectelor reacției de scăpări a transformatorului (307). 96. Cazul conducției simultane pe mai mult decât doi anodi (308).

c) Curenții primari în transformatoarele redresoarelor

308
97. Generalități (308). 98. Transformatoare monofazate și transformatoare tip manta (310). 99. Transformatoare trifazate tip simbur, cu bobinajele primare în triunghi (310). 100. Transformatoare tip simbur cu bobinajele primare în stea (313).

d) Conexiunile transformatoarelor

314
101. Generalități (314). 102. Conexiunea triunghi-stea (314). 103. Conexiunea triunghi-stea zig-zag (316). 104. Conexiunea triunghi-stea hexafazată (317). 105. Conexiunea triunghi-stea în furcă (317). 106. Conexiuni cu egalizare de fază (320). 107. Conexiunea triunghi-dublu stea (324). 108. Conexiunea triplu-monofazată (330). 109. Conexiunea Vologdin (332). 110. Conexiunea Larionov sau conexiunea hexafazată în punte (333). 111. Conexiuni dodecafazate (336). 112. Conexiunea dodecafazată în furcă (336). 113. Conexiunea cvadrolifazată (340). 114. Conexiunea triplu-cvadrolifazată (344). 115. Conexiunea dublă hexafazată (347). 116. Conexiunea dodecafazată, serie (351).

J. Redresoare polifazate cu tensiune reglabilă

357
117. Metode de reglaj al tensiunii (357). 118. Mărimi fundamentale ale redresorului comandat pe grilă (357).

K. Regimul deformant în redresoarele polifazate

364
a) Armonici

364
119. Armonici la intrarea și ieșirea redresorului (364). 120. Armonicile și factorul de ondulație al tensiunii redresate (365). 121. Armonicile în rețeaua de curent alternativ (371). 122. Influența filtrelor de netezire (372). 123. Efectul legării în paralel a redresoarelor asupra armonicilor (373). 124. Relații generale ale regimului deformant (374). 125. Efectul regimului deformant asupra puterii de calcul a transformatorului redresorului (376). 126. Efectul reactanței de scăpări a transformatorului sau a suprapunerii curenților anodici (377). 127. Influența comenzii pe grilă asupra factorului de putere și asupra producerii armonicilor (379). 128. Construcția grafică pentru determinarea puterilor în regim deformant (381). 129. Calculul exact al factorilor de putere (383).

b) Filtre de netezire pentru redresoarele polifazate

386
130. Elemente fundamentale (386). 131. Filtrul cu inductanță (388). 132. Filtrul cu capacitate (389). 133. Filtrul în L (392). 134. Filtrul în π (394). 135. Filtrul cu ramuri paralele rezonante (395). 136. Filtrul cu circuite antirezonante legate în serie (filtrul dop) (397).

L. Proiectarea redresoarelor

398
137. Principii de calcul generale (398). 138. Calculul transformatorului (399). 139. Calculul caracteristicilor redresorului (403). 140. Exemple de calcul (406).

M. Exploatarea redresoarelor

417
141. Aprinderile inverse (417). 142. Funcționarea în paralel (421). 143. Formarea redresoarelor (421). 144. Producerea de supra-tensiuni la funcționarea cu redresorul rece (422). 145. Indicații de serviciu (423). 146. Indicații de întreținere (424).

N. Redresoare uscate

424
a) Proprietăți generale

424
147. Generalități (424). 148. Realizarea tipurilor industriale de redresoare uscate (426). 149. Caracteristicile redresoarelor uscate (428). 150. Factorii care influențează caracteristicile redresoarelor uscate (430).

b) Teoria redresoarelor uscate

433
151. Fenomene fundamentale (433). 152. Conducția electrică în solide (433). 153. Conducția electrică în semiconductori (435). 154. Lucrul de extracție și diferența de potențial de contact (436). 155. Teoriile asupra redresării (437). 156. Teoria difuziei termice (438). 157. Teoria diodei (440). 158. Teoria barierei fizice (441). 159. Compararea teoriilor asupra redresării cu rezultatele experimentale (442).

c) Date tehnice privind exploatarea redresoarelor uscate

442
160. Randamentul redresoarelor uscate (442). 161. Repartiția tensiunii la mai multe elemente redresoare montate în serie (443).

162. Durata redresoarelor uscate (444). 163. Circuite cu redresoare uscate (444).

d) Utilizarea redresoarelor uscate

445
164. Încălzirea de durată a bateriilor de acumulare (445). 165. Încălzirea rapidă a bateriilor de acumulare (445). 166. Alimentarea lămpilor cu arc (447). 167. Sudarea cu arc (447). 168. Alimentarea centralelor telefonice (447). 169. Alimentarea emițătoarelor radio de mică putere (447). 170. Încălzirea tuburilor electronice ale posturilor de emisie de putere mare (447). 171. Alimentarea băilor de electroliză (447). 172. Alimentarea aparatelor Roentgen medicale (447). 173. Auto-excitarea mașinilor sincrone (447). 174. Alimentarea motoarelor de curent continuu de la rețele de curent alternativ (449). 175. Diverse alte aplicații (449).

O. Redresorul cu contacte comandate ..

449
176. Principii de funcționare (449). 177. Reglajul tensiunii (451). 178. Cuplajul redresoarelor cu contacte (451). 179. Rezultate în exploatare (451).

Anexă

Semne convenționale pentru redresoare, onduloare, pile și acumulatori

Bibliografie

A. Generalități

1. Principiul de funcționare. Pilele sau elementele galvanice primare și acumulatele electrice sau elementele galvanice secundare fac parte din clasa surselor electrochimice de energie electrică, în care energia proceselor chimice este transformată în energie electrică.

Cu toată varietatea soluțiilor date pentru obținerea diverselor construcții ale surselor electrochimice, toate sînt constituite principial, după aceeași schemă: un conductor ionic, electrolitul¹⁾, este în contact cu doi conductori metalici (electronici) de natură chimică diferită sau stări fizico-chimice diferite, electrozii. Interacțiunea în zona de contact a electrolitului cu electrozii are ca efect apariția unor potențiale electrice, denumite potențiale de electrod: cele două potențiale electrice sînt diferite, avînd în vedere natura sau starea diferită a electrozilor. Uneori, electrozii sînt în contact cu electroliti diferiți, separați prin diafragme poroase (menținerea legăturii electrice se face prin pori).

Electrodul care se încarcă la un potențial mai negativ, prin formarea la suprafața de contact cu electrolitul a unei densități de sarcini libere negative (electroni) mai mari, se numește anod, celălalt, mai pozitiv, fiind denumit catod.

Noțiunile de pol pozitiv și pol negativ coincid la sursele electrochimice cu catodul și respectiv cu anodul.

Imediat după cufundarea electrozilor în soluția de electrolit se stabilește la suprafața fiecărui electrod un echilibru al forțelor electrostatice dintre sarcinile electrice (libere) de pe cele două faze (lichidă și solidă) ale sistemului. Acest echilibru definește valorile potențialelor celor doi electrozi.

Dacă se alege sistemul sursei electrochimice astfel încît cele două valori ale potențialelor electrozilor să difere mult, curentul electric care se observă la închiderea circuitului exterior al sursei poate deveni important.

La legarea celor doi electrozi (închiderea circuitului) printr-un conductor metalic (electronic) exterior (fig. 1) surplusul de electroni care s-a format la anod se scurge spre catod, efectuînd în acest drum un lucru electric. Prin pierderea electronilor la anod, moleculele sau atomii acestui electrod se ionizează și trec în soluția de electrolit, iar ionii din electrolit întîlnesc la catod electrozii sosiți prin circuitul exterior de la anod și se descarcă trecînd în stare atomică (și apoi în stare moleculară). În acest mod materiile (active) din electrozi și din electrolit intră în reacție și se consumă treptat.

În fig. 1 s-a reprezentat un element galvanic — pila Daniel-Jacobi — compus din doi electrozi metalici, de zinc și de cupru, în contact cu soluțiile de săruri ale acestor metale.

¹⁾ Sînt electroliti: soluțiile de acizi, baze și săruri în apă sau alți solvenți, sărurile și hidroxiții în stare topită (și unele corpuri în stare solidă) în care moleculele se găsesc în stare disociată în ioni (total sau parțial) și în care trecerea curentului este produsă de deplasarea ionilor.

La anod are loc ionizarea electrodului de zinc $Zn - 2e^- \rightarrow Zn^{++}$ și trecerea ionilor de zinc în soluție. La catod, ionii de cupru din electrolit se unesc cu electronii deplasați, prin circuitul exterior, $Cu^{++} + 2e^- = Cu$ și completează rețeaua cristalină a electrodului de cupru.

2. Sistemul electrochimic și masele active. Sursele electrochimice au la bază un sistem electrochimic, reprezentat prin totalitatea substanțelor a căror interacțiune face să apară la electrozii sursei potențiale de electrod. Substanțele care iau parte la aceste reacții electrochimice se numesc mase active sau materii active

și se găsesc atât pe electrozii cît și în electrolit.

Se poate observa (fig. 1) că într-o sursă electrochimică, electrozii sînt distanțați spațial unii de alții, contactul între ei înăuntrul sistemului făcîndu-se prin electrolit (electrolit).

Sensul convențional al curentului în circuitul exterior este cel corespunzător deplasării particulelor pozitive, el este invers sensului curentului de electroni (fig. 1).

Curentul electric produs este transportat în circuitul exterior prin conductori de speța I-a — conductori metalici (electronici). În interiorul sistemului electrochimic, transportul sarcinilor se face prin conductori de speța a II-a, conductori ionici. Trecerea curentului electric este însoțită de formarea și descărcarea la cei doi electrozi a ionilor proveniți din ionizarea atomilor electrozilor și din disocierea moleculelor electrolitului.

În electrolit curentul este transportat de cele două feluri de ioni formați, și anume: cationii, care se deplasează spre catod, purtînd sarcini pozitive și anionii, care se deplasează spre anod și sînt purtători de sarcini negative.

În exemplul considerat (fig. 1) transportul curentului în interiorul elementului galvanic se face de către ionii proveniți din disocierea electrolitului din cele două compartimente: anodic (anolit) și catodic (catolit). Transportul spre anod se face de ionii radical sulfat SO_4^{--} comuni în ambele compartimente, iar în sens invers — spre catod — de ionii de cupru Cu^{++} și de zinc Zn^{++} .

3. Clasificarea și notarea surselor electrochimice. După felul de funcționare, sursele electrochimice de energie electrică se împart în surse primare, sau elemente (pile) galvanice propriu zise și surse secundare, sau acumulate electrice.

Elementele galvanice primare cuprind sursele electrochimice care, practic, pot fi utilizate numai pînă la epuizarea materiilor active. După această epuizare ele devin inutilizabile pentru o funcționare ulterioară, materiile active neputînd fi regenerate pe căi simple (reîncărcarea de la o sursă exterioră etc.). Astfel, elementul galvanic primar se fabrică pentru o singură funcționare.

Elementele galvanice secundare, sau acumulate electrice, pot servi (în principiu) un timp nelimitat, materiile active putînd fi readuse în starea inițială după epuizare, prin simplă trecere a curentului produs de o sursă exterioră, în sensul invers celui de descărcare a elementului.

Procesul regenerării substanțelor active prin curent electric poartă numele de *încărcarea acumulatorului*, fiind un proces invers celui în care materiile active

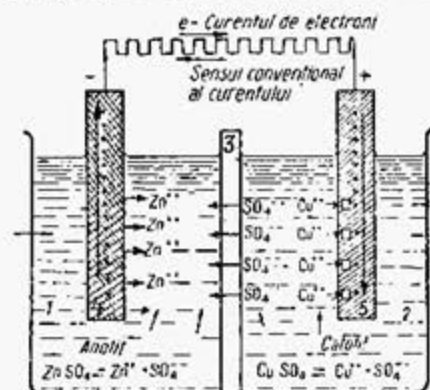


Fig. 1. — Schema unei surse electrochimice:

1 — compartiment anodic; 2 — compartiment catodic; 3 — diafragmă; 4 — anod; 5 — catod.

erau cheltuite și care se numește *descărcarea acumulatorului*. Procesul de încărcare constă în transformarea energiei electrice în energie chimică, *acumulată* în materiile active și putînd fi păstrată în acumulator și transportată cu el. Datorită acestei proprietăți de acumulare, elementele secundare au fost denumite *acumulate*.

Necexistînd o terminologie unitară pentru definirea aparatelor electrochimice care produc energie electrică, bazate pe sistemul compus din doi electrozi cufundați în soluții electrolitice, s-au folosit în prezentul capitol pentru reprezentarea diverselor tipuri ale acestor aparate, termenii uzuali în sensul lor cel mai răspîndit. În afară de termenii explicați mai sus s-au folosit următorii termeni:

Sursă electrochimică de energie electrică reprezintă orice sistem electrochimic în care energia proceselor chimice este transformată în energie electrică. Același sens îl are și termenul *element galvanic*.

Element — este un element galvanic, primar sau secundar, compus dintr-un singur vas cu electrozi și electrolit (element unitar). Același sens îl are și termenul *celulă*. Cînd se dorește a se da o precizare asupra complexității sistemului electrochimic al unui element unitar, ca de exemplu un sistem compus din mai mulți electrozi și conținînd două compartimente pentru electrolit — sistemul este denumit *lanț (galvanic)*.

Pilă — reprezintă un element primar unitar.

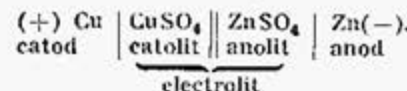
Baterie — reprezintă mai multe elemente galvanice, primare sau secundare, legate electric între ele (baterie de pile, baterie de acumulate).

Ionii proveniți din disocierea apei (electrolitul fiind o soluție apoasă) participă și ei la transportul curentului.

Notarea simbolică a sistemului electrochimic al sursei se face printr-o linie verticală simplă (|) pentru limita dintre faza solidă și cea lichidă și printr-o linie verticală dublă (||) sau punctată simplă (·) pentru limita dintre două medii lichide.

Semnele în paranteză (+) și (−) indică polaritatea fiecărui electrod.

Exemplu: Sistemul electrochimic al pilei Daniel-Jacobi se notează astfel:



Elementele galvanice primare sau secundare se reprezintă în schemele electrice prin două linii verticale, paralele, inegale (||); linia lungă și subțire reprezintă polul pozitiv.

4. Termenii și notarea în reacțiile electrochimice. În reacțiile care au loc în sursele electrochimice un rol important îl joacă reacțiile ionice în soluții apoase. Termenii și notarea folosită în descrierea acestor reacții au la bază următoarele:

a) *Disocierea electrolitică*. Moleculele electrolitilor (v. § 1) cînd sînt dizolvate în apă se desfac, într-o măsură mai mare sau mai mică, în ioni pozitivi și ioni negativi. Acest proces este denumit disocierea electrolitică și în unele condiții este un proces reversibil, astfel că în soluție se stabilește un echilibru între ioni formați și moleculele nedisociate.

Mărimea sarcinii electrice a ionului corespunde cu valența sa. Ionii se notează cu același simboluri ca și atomii, adăugîndu-se la dreapta sus semnul plus (+) în cazul sarcinii pozitive și semnul minus (−) cînd sarcina este negativă. Numărul semnelor + și − corespunde cu numărul sarcinilor ionului.

Ionii posedă alte proprietăți decît atomii elementelor respective. Astfel de exemplu ionii de sodiu (Na^+) nu reacționează cu apă, spre deosebire de atomii de sodiu, care o descompun.

Electrolitul, care prin disociere dă naștere la doi ioni se numește electrolit binar (de exemplu $\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$). Când prin disociere iau naștere 3 ioni (de exemplu $\text{Na}_2\text{SO}_4 = \text{Na}^+ + \text{Na}^+ + \text{SO}_4^{--}$) electrolitul este ternar; el este cuaternar când apar patru ioni ($\text{AlCl}_3 = \text{Al}^{++} + \text{Cl}^- + \text{Cl}^- + \text{Cl}^-$), ș. a. m. d.

Moleculele acizilor se disociază în ioni pozitivi de hidrogen și ioni negativi ai radicalilor acizi; moleculele bazelor se disociază în ioni pozitivi ai metalelor și ioni negativi hidroxil; moleculele sărurilor se disociază în ioni metalelor și ioni radicalilor acizi.

Raportul dintre numărul moleculelor disociate în ioni către numărul total de molecule care au fost dizolvate se numește gradul de disociere și se notează cu litera α .

După tendința spre disociere, electrolitii se împart în electroliti tari și slabi. Electrolitii tari au gradul de disociere mare (~ 1) și sînt reprezentați prin acizi și baze tari și prin majoritatea sărurilor. Electrolitii slabi au gradul de disociere mic (0,01–0,05). Ei se compun din acizi slabi și baze slabe. Gradul de disociere descrește și cu creșterea concentrației soluției.

β) *Concentrația soluțiilor* se notează cu litera C sau cu simbolul chimic al substanței cuprins între paranteze pătrate $[s]$ și reprezintă cantitatea de substanță conținută într-o anumită cantitate (greutate) a soluției (concentrația gravimetrică) sau într-un anumit volum al soluției (concentrația volumetrică). Expresia generală a concentrației substanței în soluție este:

$$[s] = C = \frac{n}{V}, \quad (4.1)$$

în care: n este numărul de unități gravimetrice sau volumetrice;

V — volumul sau greutatea unui volum de soluție.

Expresia $V = \frac{n}{C}$ reprezintă diluția. (4.2)

Se utilizează următoarele moduri de exprimare a concentrației:

a) *Concentrația echivalentă și molară*: se indică numărul de echivalenți-gram de substanță dizolvată într-un centimetru cub de soluție (η), sau numărul de gram-molecule într-un centimetru cub de soluție (μ).

b) *Soluțiile molare*: se indică numărul de gram-molecule (M -moli) de substanță dizolvată conținută într-un litru de soluție. Soluțiile se notează prin: 1M — uni-molare, 2M — bimolare, 0,1M — decimolare, 0,01M — centimolare, după numărul (întreg sau fracțiune) de moli dizolvați într-un litru.

Soluțiile molare sînt utile deoarece la aceeași concentrație, volumele lor egale conțin același număr de molecule.

c) *Soluțiile normale*: se indică numărul de echivalenți-gram de substanță dizolvată într-un litru de soluție. Notarea se face ca și la soluțiile molare, soluția conținând un echivalent-gram de substanță dizolvată într-un litru (soluția normală) se notează prin 1N; doi echivalenți-gram (binormală) — 2N; tot astfel și soluțiile deci, centi, mili-normale: 0,1N; 0,01N; 0,001N.

Soluțiile normale se folosesc la soluții de electroliti. Avantajul principal al acestei exprimări a soluțiilor de electroliti, față de alte exprimări constă în faptul că la aceeași normalitate a soluției vor reacționa volume egale de substanță.

Față de exprimarea concentrației în η și μ , soluția exprimată în concentrație normală va corespunde cu 1N = 1000 η iar în concentrația molară 1M = 1000 μ .

d) *Concentrația procentuală*: indică cantitatea de unități gravimetrice conținute în 100 unități gravimetrice ale soluției. De exemplu soluția apoasă 15% KCl conține 15 g KCl și 85 g apă.

e) *Indicarea greutății specifice a soluției* (uneori în grade Baumé) caracterizează și ea concentrația cu care este proporțională.

γ) *Activitatea electrolitilor*. Concentrația substanței în soluțiile ideale, ca și presiunea parțială în amestecuri de gaze ideale, exprimă proprietățile acestui component în soluție, independent de natura lui sau de condițiile exterioare. În soluțiile reale acest lucru nu este valabil din cauza interacțiunii moleculelor și a ionilor soluției, hidratării lor etc. Astfel, termenul de concentrație se înlocuiește prin termenul de *activitate*, care corespunde concentrației efective la care soluția ideală capătă proprietățile termodinamice (v. § 6), ale soluției reale considerate:

$$a = f_a C, \quad (4.3)$$

în care f_a este coeficientul numeric de corecție, denumit coeficient de activitate.

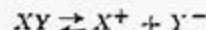
δ) *Concentrația ionilor* este numărul de gram-ioni (g-ion exprimă numeric greutatea atomică a elementului din care derivă) conținuți într-o unitate de volum sau de greutate a soluției. Concentrația ionilor depinde de concentrația reală (activitatea) a electrolitului în soluție dată, de numărul n_i de ioni care se formează dintr-o moleculă a electrolitului și de gradul de disociere α al electrolitului.

În cazul soluțiilor diluate și a electrolitilor slab disociați, concentrația ionilor C_i se calculează cu ajutorul formulei:

$$C_i = C \cdot \alpha \cdot n_i. \quad (4.4)$$

În cazul soluțiilor concentrate și a electrolitilor tari se introduce în formula (4.4) coeficientul de activitate f_a .

ϵ) *Echilibrul procesului de disociere*. Procesul de disociere electrolitică este un proces reversibil, deoarece ionii de semn contrari, întâlnindu-se în soluție, se pot recombina în molecule. Notînd cu XY molecula nedisociată și cu X^+ și Y^- cationii și anionii și scriind semnul de egalitate în ecuația reacției reversibile cu două săgeți îndreptate în sensuri contrarii (indicînd astfel posibilitatea desfășurării procesului în ambele sensuri) disocierea unui electrolit se poate reprezenta prin ecuația:



și în conformitate cu legea acțiunii maselor ecuația de echilibru va fi:

$$\frac{[X^+][Y^-]}{[XY]} = K, \quad (4.5)$$

în care constanta de echilibru K este constanta de disociere electrolitică. Când substanța care se disociază este greu solubilă, concentrația ei este constantă:

$$K[XY] = \text{const. și relația 4.5 devine } [X^+][Y^-] = K_s;$$

constantă K_s se numește produsul ionic al substanței greu solubile (v. § 7).

ζ) *Disocierea apei și factorul de hidrogen (pH)*. În apă pură, totdeauna, o parte (foarte mică) de molecule sînt disociate în ioni: $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$. Măsurătorile arată că la temperatura normală (24°C) concentrațiile ionilor de hidrogen și hidroxil sînt egale între ele și reprezintă $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ g-ion/l. Produsul $[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-14}$ este o constantă (la 24°C) și se numește produsul

ionic al apei. Acest produs este constant nu numai pentru apa pură dar și pentru soluțiile apoase (diluante) ale tuturor substanțelor.

Soluțiile în care concentrația ionilor de hidrogen și hidroxil sînt aceleași, fiind egale deci cu 10^{-7} g-ion/l se numesc soluțiile neutre. În soluțiile acide $[H^+] > [OH^-]$, în soluțiile alcaline $[H^+] < [OH^-]$, însă ori care ar fi concentrațiile respective, produsul lor este constant și egal cu 10^{-14} (la $24^\circ C$), astfel că, cunoscînd concentrația unuia din ioni se poate afla imediat concentrația celuilalt. În genere aciditatea sau alcalinitatea soluției se exprimă prin concentrația ionilor de hidrogen, deseori exprimată prin factorul pH, care este cologaritmul zecimal al acestei concentrații: $pH = -\lg [H^+]$. Astfel soluțiile neutre au $pH = 7$, cele acide $pH < 7$ și cele alcaline $pH > 7$. În calcule logaritmice se rotunjește pînă la 0,01 deoarece acest ordin de precizie este atins în măsurătorile pH-ului.

7) *Notarea caracteristică a reacțiilor ionice.* Ecuațiile chimice la reacții ionice au o notare caracteristică acestor reacții. De exemplu, reacția între zinc și soluția de sulfat de cupru care se scrie în mod obișnuit (în partea stîngă substanțele inițiale, iar în partea dreaptă — produsele reacției):



se va scrie arătîndu-se starea disociată a sării din electrolit:



Simplificîndu-se ionii comuni în ambii termeni ai ecuației, se obține o ecuație simplă:



Cînd reacția decurge în condiții de reversibilitate, ea se scrie:



indicînd astfel posibilitatea desfășurării procesului de la stînga spre dreapta și de la dreapta spre stînga.

8) *Reacțiile ionice în soluții* Reacțiile ionice în soluții de electroliti decurg în mai multe feluri. În alegerea reacției generatoare de energie este important să se cunoască (din punct de vedere al reversibilității sistemului) dacă produsul reacției este și el ionizabil, adică dacă desfășurarea autonomă a proceselor la electrozi duce (sau nu) la micșorarea numărului de ioni în soluție.

Reacțiile ionice care nu duc la micșorarea numărului de ioni în soluție sînt reacțiile care au ca produs combinațiile ușor solubile și ușor ionizabile. Acestor reacții aparțin reacțiile de substituție și reacțiile denumite în sens restrîns de oxidare-reducere.

În reacțiile ionice de substituție un metal mai electronegativ înlocuiește într-o combinație un alt metal mai electropozitiv. De exemplu în reacția (6.1—6.2) zincul se substituie cuprului (din sulfat de cupru) prin transferul de electroni de la zinc (metal electronegativ — v. § 17) la cupru (metal electropozitiv).

Se vede că în acest proces numărul ionilor nu se micșorează.

În reacțiile de oxidare-reducere (propriu zise), ionii aceluiasi element putînd avea valențe diferite (de exemplu Pb^{2+} și Pb^{4+} ; Mn^{2+} , Mn^{3+} și Mn^{4+} etc.), prin schimbul de sarcini între ei trec de la o valență la alta (se oxidează și se reduce). Acești ioni reacționînd la anod, prin cedarea de electroni (oxidare) își măresc valența (pozitivă): $Pb^{2+} - 2e^- \rightleftharpoons Pb^{4+}$, iar la catod, prin anexarea de electroni (reducere) își micșorează valența (pozitivă): $Pb^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb^{2+}$.

Reacțiile ionice care decurg în sensul micșorării numărului de ioni în soluție sînt cele care au ca produs combinații greu solubile sau (și) greu ionizabile. Acestor reacții aparțin:

— reacțiile de formare a combinațiilor greu solubile ca cele în care ionul SO_4^{--} se combină cu ionul Pb^{2+} . De exemplu: $PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$ (primul produs este greu solubil, al doilea greu ionizabil);

— reacțiile de neutralizare între acizi și baze. Aceste reacții au ca produs apă (greu ionizabilă) și o sare;

— reacțiile între un acid tare cu o sare a unui acid slab sau între o bază tare cu o sare a unei baze slabe; rezultatul acestei reacții este un acid slab sau o bază slabă, adică electroliti puțin disociabili (ionizabili);

— reacțiile în care produsul este o sare complexă.

B. Teoria surselor electrochimice

5. *Procesul transformărilor energetice.* Prin teoria surselor electrochimice se înțelege principiul fizic al transformării energiei reacțiilor chimice în energie electrică și teoria reacțiilor electrochimice. Aplicarea reversibilității termodinamice la reacțiile care decurg în sursele electrochimice (procesele primare fără pierderi) a permis stabilirea formulelor de calcul al f.e.m., iar aplicarea legilor electrolizei — stabilirea formulelor de calcul al cantității de electricitate (capacității în Ah) pe care o poate furniza sursa electrochimică.

Procesele secundare nereversibile, care determină căderile de tensiune ohmică și de polarizare sînt mai puțin supuse studiului termodinamic. Totuși și în acest domeniu s-au putut stabili unele relații cantitative.

Principiul transformării energetice care are loc în sursele electrochimice este foarte complex și este legat de caracteristicile stărilor solidă și lichidă ale componentilor activi. El poate fi explicat, cu totul schematic, prin unele aspecte ale proceselor energetice care intervin în reacțiile chimice ale combinațiilor heteropolare (ionice). Aceste reacții se produc prin schimb de electroni (de valență) între atomi sau molecule ale componentilor activi ai sursei electrochimice, care trec în stare de ioni, în diferite faze ale reacției.

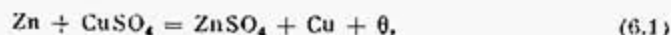
Energia de ionizare a atomilor unui element dat este o mărime care variază după o anumită lege, la trecerea de la o grupă la alta a sistemului periodic al lui Mendeleev. Ea crește de la grupa I către grupa a VIII-a. Cînd se apropie unul de altul doi atomi, din care unul este de exemplu din grupa a II-a și altul din grupa a VII-a, avînd deci potențiale de ionizare diferite (adică energii de ionizare diferite), distanța fiind suficient de mică și celelalte condiții corespunzătoare îndeplinite, se produce combinarea lor chimică. Schematic (și valabil pentru majoritatea reacțiilor heteropolare), are loc *trecerea electronului de la atomul cu potențialul de ionizare mai mic, la atomul cu potențialul de ionizare mai mare. Energia pusă în libertate la această trecere a electronului apare sub forma efectului termic al reacției chimice.*

Trecerea electronului de la un atom la altul reprezintă deplasarea sarcinii electrice, adică un curent electric. Astfel, reacțiile chimice de combinare electrovalentă (ionică) sînt legate de trecerea curentului.

Avînd în vedere că la o reacție chimică participă un număr enorm de atomi și de molecule, dispuse în mod diferit unele față de altele și găsindu-se într-o mișcare dezordonată, se poate afirma că și mișcările electronilor sînt dezordonate, iar reacția chimică heteropolară (ionică) poate fi privită ca un proces de scurtcircuitare a unui număr foarte mare de particule cu potențiale diferite. În acest proces, întreaga energie produsă (de natură electrică), apare sub forma energiei

termice. Pentru a evita eliberarea energiei sub formă termică, trebuie construit un sistem care să permită dirijarea deplasării electronilor pe anumite căi și cu o anumită viteză. Acest lucru se realizează în sursele electrochimice de energie electrică.

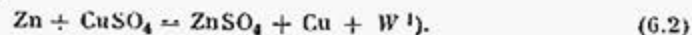
6. Reacțiile ionice în sursele electrochimice de energie electrică. Reacțiile care stau la baza proceselor generatoare de energie electrică în elementele galvanice sînt reacțiile heteropolare (ionice) și anume cele de oxidare-reducere, în sensul general la care una din substanțe se oxidează, iar cealaltă se reduce. Din punct de vedere electrochimic, oxidarea reprezintă cedarea (eliberarea) electronilor, iar reducerea, primirea (fixarea) electronilor. Dacă procesul de oxidare-reducere nu se produce într-un sistem de element galvanic ca acela arătat mai înainte, cu alte cuvinte dacă procesul de eliberare a electronilor nu este separat de procesul fixării electronilor (este produs fără electrozi distanțați), schimbul de electroni care se produce la ciocnirea particulelor în reacție este un schimb în scurtcircuit și se manifestă numai printr-un efect termic. Astfel, dacă într-o soluție de sulfat de cupru se introduce zinc metalic, interacțiunea unui gram-mol de sulfat de cupru și a unui gram-atom de zinc va produce un efect termic (căldura reacției) și soluția se va încălzi:



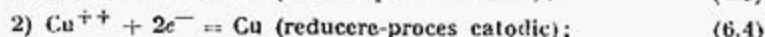
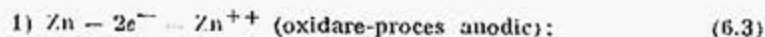
în care θ este efectul termic al reacției [în cazul reacției (6.1) $\theta = 50-100$ cal].

Dacă se separă componenții activi sub forma a doi electrozi distanțați printr-un electrolit și se dă o formă corespunzătoare elementului, arătată în fig. 1, energia reacției se obține ca energie electrică.

În exemplul cu pila cupru-zinc (elementul Daniel-Iacobi) procesul sumar se poate scrie ca și în cazul cufundării directe a zincului în soluție de sulfat de cupru, apărînd în termenul din dreapta, în locul efectului termic, energia electrică debitată de pilă:



Acest proces este compus din două reacții separate care au loc la cei doi electrozi:



Deoarece electrozii sînt separați printr-un conductor ionic, electronii eliberați din zinc vor putea trece la cupru numai printr-un conductor exterior (electronic), producînd curentul electric.

În sensul celor de mai sus electrozului la care se produce eliberarea electronilor (reacția de oxidare) se numește *anod* iar electrozului la care are loc fixarea electronilor (reacția de reducere) se numește *catod*. Deci, în elementul Daniel-Iacobi electrozului de cupru este catod, iar electrozului de zinc, anod.

Energia electrică produsă de reacția (6.2) este $W = QU$ (în care Q este cantitatea de electricitate debitată și U tensiunea la bornele pilei). Avînd în vedere că la cei doi electrozi au reacționat câte 1 gram-atom de metal și că valența reacției este doi, energia produsă va fi:

$$W = 2FU,$$

în care F este numărul lui Faraday = $96\,496 \pm 0,7$ coulombi/echivalent-gram (U în volți, W joule).

¹⁾ Relația care există între W și θ este explicată în § 19.

Pentru o reacție cu valența n și în cazul cînd reacția este reversibilă și f.e.m. a pilei este egală cu tensiunea la borne:

$$W = nFE. \quad (6.6)$$

F.e.m. (E) este egală cu diferența între potențialele celor doi electrozi:

$$E = V_+ - V_- = V_K - V_A, \quad (6.7)$$

în care V_K este potențialul catodului și V_A potențialul anodului.

Reacția (6.2) constă la anod în dizolvarea zincului care trece în soluție sub formă de ioni (bivalenți) și eliberează pe electrod doi electroni iar la catod în depunerea ionilor de cupru prin fixarea celor doi electroni sosiți de la anod prin circuitul exterior al pilei. Potențialul care ia naștere la fiecare din cei doi electrozi poate fi dedus din expresia variației energiei libere ΔG , care are loc în cadrul reacțiilor la anod, respectiv la catod, și care în acest caz va fi egală cu W_- respectiv W_+ (energia totală W este egală cu suma algebrică a celor două energii $W = W_+ - W_-$).

ΔG — variația (descreșterea) energiei libere — reprezintă o funcție caracteristică a stării sistemului, egală cu lucrul maxim A care poate fi obținut de la sistemul considerat, cînd procesul este reversibil¹⁾ și decurge la temperatură și presiune constantă. Această funcție, denumită și potențialul termodinamic izobar și izoterm (sau simplu izobar), este folosită în cazul reacțiilor electrochimice drept criteriu al desfășurării autonome a procesului la electrod.

Transformările ce au loc la electrozii cufundați în electrolit, sînt legate de trecerea dintr-o fază într-alta a particulelor purtătoare de sarcini — ioni sau electroni. Variația energiei libere a acestui sistem (pentru T și $P = \text{const.}$) cînd se introduce în sistem 1 g-mol de ioni sau electroni, este egală cu lucrul necesar învingerii forțelor chimice și electrice și reprezintă potențialul electrochimic (de electrod) generat în acest proces de transport de sarcini.

Variația energiei libere ΔG , la trecerea unui gram-atom de metal de pe electrod în soluție (de exemplu $\text{Zn} - 2e^- \rightarrow \text{Zn}^{++}$), cînd procesul este reversibil, se poate calcula astfel: se notează cu G_e energia liberă a ionilor metalului din electrod și cu G cea a ionilor metalului din soluție; cunoscînd din termodinamică că:

$$G = G_0 + RT \ln a_+, \quad (6.8)$$

în care:

a_+ este activitatea ionilor metalului în soluția dată;

G_0 — energia liberă a ionului în soluție cînd $a_+ = 1$;

R — constanta gazelor ideale,

$$-\Delta G = nFV = G - G_e = G_0 + RT \ln a_+ - G_e, \quad (6.9)$$

în care V este potențialul electrodului considerat, F — numărul lui Faraday și n — valența (numărul de sarcini) ionului.

Din această relație se poate calcula valoarea potențialului V :

$$V = -\frac{G_0 - G_e}{nF} + \frac{RT}{nF} \ln a_+. \quad (6.10)$$

Primul termen nu depinde de activitatea ionilor metalului, fiind egal cu saltul de potențial la suprafața de separație a metalului cu soluția, care conține ioni

¹⁾ Procesul termodinamic reversibil este un proces care admite posibilitatea întoarcerii sistemului în stare inițială, fără ca în mediul înconjurător să rămîna vreo transformare produsă de acest proces.

ai acestui metal cu activitatea $a_+ = 1^1$). Notînd acest potențial cu V^0 , relația (6.10) devine:

$$V = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln a_+ \quad (6.11)$$

Actualmente sînt cunoscute activitățile multor electroliți; ele se exprimă în moli-electrolit la 1000 g solvent (v. § 4β).

Pentru soluții electrolitice diluate valorile activităților sînt foarte apropiate de valorile concentrațiilor. În acest capitol se vor exprima activitățile ionilor prin concentrațiile lor, admițînd astfel a priori unele erori datorate faptului că soluțiile de electroliți folosite în sursele electrochimice sînt deseori de concentrații relativ mari și uneori chiar saturate (v. § 4γ).

Relația (6.11) exprimată în funcție de concentrația ionilor metalului în soluție se scrie (formula lui Nernst):

$$V = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{M+} \quad (6.12)$$

În afară de notarea generală C_{M+} , reprezentînd concentrația ionului metalului în soluție, se vor utiliza și notările C_{K+} și C_{An+} pentru concentrațiile ionilor metalului în apropierea catodului, respectiv a anodului, reacția la electrodul respectiv avînd valența n .

Variația energiei libere ΔG , depinde de natura reacției, care are loc între materiile active ale electrozilor și electroliților folosiți în pila dată.

Relațiile (6.11) și (6.12) se referă la procesele de echilibru, adică cînd sistemul electrod-soluție este supus la acțiunea nelătruptă a unor forțe infinite mici, procesul decurgînd printr-un șir nelătrupt de stări de echilibru.

Procesele de echilibru se caracterizează prin:

- egalitatea între forțele care acționează asupra sistemului și forțele proprii ale sistemului care li se opun;
- lipsa oricărui pierdere, deoarece sistemul execută un *lucru maxim*;
- reversibilitatea, care are loc cînd sistemul este supus unui proces invers, trecînd în stare inițială printr-un șir nelătrupt de stări de echilibru.

7. Clasificarea electrozilor întrebuiți în sursele electrochimice. Se deosebesc trei tipuri de electrozi:

α) Electrozi de ordinul 1 sînt electrozi metalici cufundați în soluțiile sărurilor proprii și reversibili în raport cu ionii lor din soluție (cationii).

Potențialul de electrod, care ia naștere prin cufundarea metalului în electrolit, are o mărime care este determinată de relația (6.12):

$$V_{Mn+} = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{Mn+}, \quad (7.1)$$

în care: V_{Mn+} este potențialul de electrod al metalului în soluția dată, în V;

V^0 — potențialul normal al metalului dat, în V;

F — numărul lui Faraday $\approx 96\,500$ C;

C_{Mn+} — concentrația ionilor metalului dat în g-ion/l;

n — valența ionului considerat;

R — constanta gazelor, 8.31 joule/°K.mol.

¹⁾ Acest potențial se numește potențialul normal (standard) de electrod (v. § 17).

Introducînd valorile lui R și F și trecînd la logaritmi zecimali, pentru o temperatură a soluției de 18°C, relația devine:

$$V = V^0 + \frac{0,058}{n} \lg C_{Mn+} \quad (7.2)$$

Electrodul de hidrogen se comportă și el ca un electrod reversibil față de cationi.

Electrozii de ordinul 1 sînt folosiți ca anodi în toate sursele electrochimice. În unele sisteme ei sînt folosiți și drept catodi.

β) Electrozi de ordinul 2. Metalozii (oxigenul și halogenii) constituie electrozi de ordinul 2. Mărima potențialului se determină printr-o relație asemănătoare relației (7.2):

$$V = V^0 - \frac{0,058}{n} \lg C_{An-} \quad (7.3)$$

În care semnul minus provine din faptul că echilibrul se stabilește față de anioni. Electrozi de ordinul 2 sînt deci reversibili față de anioni.

Tot de ordinul 2 sînt electrozii metalici acoperiți cu combinații (săruri) greu solubile ale acestor metale. Electrozi se cufundă în electroliți ușor solubili care au anionul comun cu sarea metalului aplicată pe electrod.

Acești electrozi se caracterizează printr-o mare constantă a potențialului. Din această cauză ei constituie baza sistemelor electrochimice la mai multe surse galvanice și pile etalon și sînt utilizați ca electrozi de comparație; se utilizează în sursele electrochimice numai drept catodi. De exemplu: electrodul de argint, acoperit cu un strat de clorură de argint (AgCl) și cufundat într-o soluție de clorură de amoniu $\text{Ag}|\text{AgCl}(\text{solid})|\text{NH}_4\text{Cl}$.

Expresia potențialului de electrod al acestor electrozi este următoarea:

$$V = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{L}{C_{a-}}, \quad (7.4)$$

în care: L este produsul de solubilitate al sării greu solubile¹⁾;

C_{a-} — concentrația anionului comun al electrodului și soluției, în g-ion/l.

¹⁾ Produsul de solubilitate L este o mărime constantă care caracterizează starea de echilibru între sarea solidă, pe de o parte și ionii ei în soluție, pe de altă parte:

$$C_{k+} \cdot C_{a-} = \text{const} = L.$$

Conform acestei relații, solubilitatea sării greu solubile în soluția cu care este în contact, depinde de concentrația ionilor de același fel existenți în soluție. Ea scade pe măsură ce crește concentrația unuia din ioni. De exemplu, solubilitatea AgCl va scădea cu creșterea concentrației ionilor Cl^- proveniți din disocierea NH_4Cl , deoarece $C_{\text{Ag}+} \cdot C_{\text{Cl}-} = \text{const} = L_{\text{AgCl}}$. Altfel spus: solubilitatea în apă a PbSO_4 (sulfatul de plumb care se formează la descărcarea acumulatorilor de plumb) este de 44,5 mg/l (la 25°C); ea este de numai 1,2 mg/l într-o soluție de 20% H_2SO_4 , deoarece în acest acid s-a modificat (a crescut) concentrația ionului comun SO_4^{2-} :

$$C_{\text{Pb}2+} \cdot C_{\text{SO}_4^{2-}} = \text{const} = L_{\text{PbSO}_4}$$

Se poate arăta că activitatea (concentrația) cationilor metalului în soluție este determinată de produsul de solubilitate a sării sale greu solubile și de activitatea (concentrația) anionilor. Activitatea anionilor, la rîndul ei, este determinată de concentrația sării ușor solubile din electrolit. Într-adevăr din definiția produsului de solubilitate urmează că:

$$C_k^{n+} = L \frac{1}{C_a^{n-}}, \quad (\text{v. continuarea la pag. 12})$$

γ) *Electrozii de ordinul 3* sînt constituiți din electrozi inerti (metale nobile, cărbune, grafit, etc.) cufundați într-o soluție conținând ionii de valență diferită ai unui același element, de exemplu: ionii Fe^{++} și Fe^{+++} (v. § 40, al. 5).

Potențialul de electrod al unui electrod de ordinul 3 nu ia naștere ca urmare a formării sau a descărcării ionilor proprii ai electrodului, ci ca rezultat al schimbării valenței ionilor din electrolit; electrodul nu face decît să transmită electronii necesari reacțiilor de oxidare-reducere sau eliberați în cadrul acestor reacții, el însuși neluînd parte la ele.

În acest caz, potențialul de electrod este dat de formula:

$$V = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1 C_2 C_3}{C'_1 C'_2 C'_3}, \quad (7.5)$$

în care: C_1, C_2, C_3 este concentrația ionilor cu grad de oxidare superior;

C'_1, C'_2, C'_3 — concentrația ionilor cu grad de oxidare inferior, sau:

$$V = V^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{ox}}{C_{red}}, \quad (7.6)$$

în care: C_{ox} este concentrația formei oxidate a substanței în soluție dată;

C_{red} — concentrația formei reduse a substanței în soluție dată.

8. *Combinarea electrozilor de diferite ordine în sisteme electrochimice* (elemente sau pile galvanice). Pentru ca doi electrozi, cufundați în soluțiile respective să formeze un sistem electrochimic generator de energie electrică, trebuie ca valoarea celor două potențiale pe care le formează cu electrolitul sau electrolitii să fie diferită. În mod practic, diferența trebuie să fie suficient de mare pentru a permite colectarea unei cantități utilizabile de energie.

9. *Pila constituită din electrozi de ordinul 1*: două metale diferite, fiecare cufundat într-o soluție a sării sale. Se aleg două metale, dintre care unul aparține metalelor electronegative, iar celălalt, metalelor electropozitive (fig. 1)¹⁾; cele două metale cufundate în soluțiile propriilor lor săruri, vor avea potențialele diferite — V_K și V_A — astfel că vor debita curent cînd sînt legate printr-un conductor exterior. F.e.m. E a sistemului (diferența de potențial între cei doi electrozi cînd pila nu debitează) va fi (6.7):

$$E = V_K - V_A,$$

în care C_K este concentrația în soluție a cationilor care participă la formarea potențialului de electrod, C_A — concentrația anionilor din soluție, iar n_A și n_K sînt valențele anionului și cationului.

Introducînd valoarea lui $C_K^{n_A}$ în formula (7.1) se obține:

$$V = V^0 + \frac{RT}{n_K F} \ln \frac{L^{n_A}}{C_K^{n_A}} = V^0 - \frac{RT}{n_K F} \ln C_A^{n_A} = V^0 - \frac{RT}{n_A F} \ln C_A. \quad (7.4')$$

Din această relație se vede că datorită valorii constante a produsului de solubilitate L un astfel de electrod este reversibil față de anioni.

Importanța practică a acestor electrozi constă în faptul că se pot realiza electrozi reversibili față de anioni ca SO_4^{--} , OH^{--} , etc. (de exemplu: $\text{Hg}|\text{Hg}_2\text{SO}_4|\text{H}_2\text{SO}_4$ sau $\text{Hg}|\text{HgO}|\text{NaOH}$).

¹⁾ Metalele sînt electronegative sau electropozitive după cum se încarcă negativ sau pozitiv față de soluția în care au fost introduse sau față de electrodul de hidrogen (v. § 18).

în care s-a notat cu indicii K electrodul care se încarcă pozitiv (catodul) și A , electrodul care se încarcă negativ (anodul). Conform formulei (6.12) se poate scrie:

$$E = \left(V_K^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{K^+} \right) - \left(V_A^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{A^+} \right), \quad (9.1)$$

în care C_{K^+} este concentrația în soluție a ionilor metalului catodic și C_{A^+} cea a ionilor metalului anodic.

Formula (9.1) se poate scrie sub forma:

$$E = (V_K^0 - V_A^0) + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{K^+}}{C_{A^+}}, \quad (9.2)$$

sau:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{K^+}}{C_{A^+}}. \quad (9.3)$$

Pentru $t = 25^\circ\text{C}$ ($T = 298^\circ\text{K}$) și introducînd valorile lui R și F (7.1) și trecînd a logaritmi zecimali:

$$E = E^0 + \frac{0,059}{n} \lg \frac{C_{K^+}}{C_{A^+}}. \quad (9.4)$$

Formula (9.1) se referă la elementele galvanice (pile și acumulatori) compuse din electrozi reversibili. Aceste sisteme funcționează și ele reversibil cînd sînt realizate următoarele condiții:

a) f.e.m. E întrece numai cu o mărime infinit mică f.c.e.m. aplicată de la o sursă exterioară;

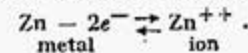
b) reacțiile din element pot fi inversate în mod integral, cînd se aplică de la o sursă exterioară o f.c.e.m. (tensiune) care întrece numai cu o mărime infinit mică f.e.m. a elementului dat.

Funcționarea pilei (reacțiile la electrozi și în electrolit) se poate reprezenta sub forma unor ecuații caracteristice. Astfel, de exemplu, elementul Daniel-Iacobi (fig. 1) constituit din doi electrozi metalici, cufundați în două soluții de electrolit ale sărurilor metalelor respective, despărțiți printr-o diafragmă, are următoarea schemă de funcționare:

α) *Reacția generală de funcționare:*



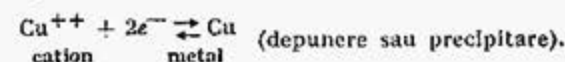
β) *Procesul la anod* (polul negativ): ionizarea zincului,



γ) *Deplasarea electronilor de la anod la catod:*

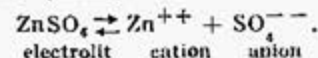


δ) *Procesul la catod* (polul pozitiv): descărcarea ionilor de cupru,

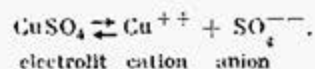


ε) *Procesul în electrolit.*

Compartimentul anodic (anolit):

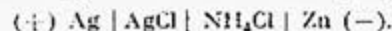


5) Compartimentul catodic (catolit):



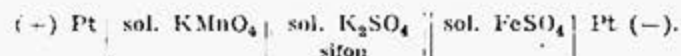
Observație. Electroliții pot fi comuni pentru ambii electrozi, mai ales în cazul când unul din ei (catod) este de ordinul 2 sau 3.

10. Pila constituită din electrozi de ordinul 2. Unul din electrozi (de obicei electrodul pozitiv), este de ordinul 2; concentrația C_{K+} fiind egală cu: $\frac{L}{C_A -}$ (v. § 7) ecuația (9.1) rămâne valabilă și pentru acest caz. Exemplu, pila cu clorură de argint:



11. Pila constituită din electrozi de ordinul 3 (de oxidare-reducere). Ele cuprind în principiu doi electrozi neutri, care pot fi identici, cufundați: catodul într-o soluție oxidantă, anodul într-o soluție reductoare. Cele două soluții sînt unite prin sifoane electrolitice (v. § 12).

De exemplu, electrozii de platină cufundați în soluțiile care formează sistemul:



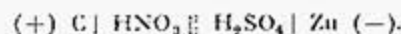
În practică, numai electrodul pozitiv (catod) este de ordinul al treilea; schimbarea valenței substanței active, care se găsește, fie în soluție, fie aplicată pe electrod însă solubilă într-o anumită măsură în electrolit, este produsă de electronii care sosesc prin circuitul exterior de la polul negativ (anod), format dintr-un metal electronegativ (zinc, cadmiu, magneziu etc.).

Expresia f.e.m. a pilei cu electrodul pozitiv de ordinul al treilea este:

$$E = \left(V_{\text{redox}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_{\text{ox}}}{C_{\text{red}}} \right) - \left(V_A^0 + \frac{RT}{nF} \ln C_{A+} \right). \quad (11.1)$$

Ca electrod neutru — colector de curent — se întrebuințează cărbunele sau grafitul (în principiu, cărbunele este considerat ca neîntrebuințat la reacții, însă, după unii autori, el este ionizabil).

De exemplu, pila cu acid azotic (Bunsen), (v. § 39 β):



12. Potențiale de contact lichid și pile de concentrație. Dacă în elementul galvanic reprezentat în fig. 1 se înlocuiesc electrozii cu doi electrozi inerti (identici), nu mai au loc reacții la electrozi însă se observă prezența unei f.e.m. care este produsă de diferența de potențial între cei doi electroliți, de natură și concentrație diferită. Dacă electrolitul în ambele compartimente este același, însă concentrațiile ionice sînt diferite în cele două compartimente (de exemplu $C_1 > C_2$), se observă și în acest caz existența unei diferențe de potențial din cauza diferenței între cele două concentrații. Acest potențial este denumit potențial de contact lichid, iar elementul galvanic se numește în acest caz pilă de concentrație.

Expresia f.e.m. a pilei de concentrație este:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}.$$

Diferența de potențial de contact lichid se poate elimina intercalând între cei doi electroliți de concentrații diferite un al treilea electrolit intermediar (într-un vas legat prin sifoane electrolitice S (fig. 2), cu cele două vase cu electroliți) constituit dintr-o soluție saturată a unei sări de potasiu sau amoniu (clorură, sulfat, azotat).

13. Elemente reversibile și elemente nereversibile. Sursele electrochimice pot prezenta atât sisteme reversibile cît și sisteme nereversibile. Sisteme reversibile vor fi acele sisteme la care materiile active revin în starea inițială, după ce au primit din afară energia electrică. Sistemele nereversibile, în aceleași condiții, nu refac materiile active inițiale. În acest caz trebuie să se deosebească nereversibilitatea fizică, acestea constînd în faptul că, după primirea energiei electrice din afară, materiile active nu se obțin în aceeași stare fizică, astfel încît nu pot fi utilizate din nou. De exemplu la elementul Daniel-Iacobi, la care cu toate că sistemul este reversibil, în timpul încărcării, zincul se formează sub formă de precipitat și nu mai poate fi utilizat în element.

C. Caracteristici electrice și electrochimice principale

14. Forța electromotoare este suma algebrică a potențialelor anodului V_A și catodului V_K față de electrolit, măsurate în raport cu un electrod de referință:

$$E = V_K - V_A = V_{(+)} - V_{(-)}.$$

Astfel măsurarea potențialelor electrozilor cît și aceea a f.e.m. a elementelor galvanice se face prin metode de opoziție (potențiometrice) (fig. 5). În mod expeditiv, măsurarea poate fi făcută și cu ajutorul unui voltmetru de rezistență interioară mare ($R \geq 10\,000 \Omega/V$) necesară reducerii atât a efectului de polarizare provocat de trecerea curentului, cît și a efectului căderii de tensiune pe rezistența interioară a elementului.

Pe cînd f.e.m. poate fi măsurată legînd electrozii direct la bornele aparatului de măsurat, măsurarea potențialelor de electrod prezintă anumite particularități.

15. Metode de măsurare a potențialelor de electrod. Pînă în prezent nu s-a putut găsi metoda directă pentru măsurarea saltului de potențial în stratul dublu electrod-soluție, care determină mărimea potențialului de electrod. Dificultatea constă în imposibilitatea de a realiza un contact cu faza lichidă fără a apărea potențiale noi.

Metoda stabilită este aceea de comparație cu un electrod de referință. În acest scop sistemul electrochimic reprezentat în fig. 1 (elementul Daniel-Iacobi) se execută în construcție modificată și anume formînd două semielemente (semipile) fiecare cuprinzînd un electrod. Legătura între cele două semielemente se face prin chei electrolitice (sifoane) care leagă vasul fiecărui electrod cu un vas cu soluție intermediară, care este de obicei o soluție de clorură de potasiu. Schimbînd unul din electrozi cu un electrod de referință considerat a fi la un potențial zero,

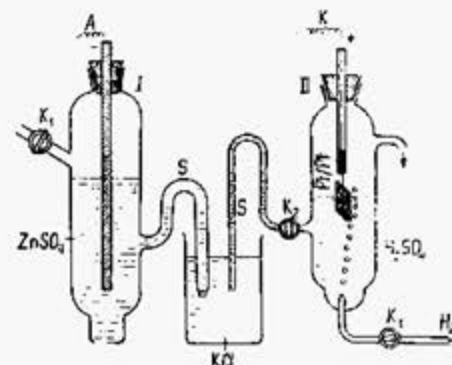


Fig. 2. — Lant electrochimic format din două semipile.

se formează un element galvanic (sistem electrochimic) a cărui f.e.m. reprezintă potențialul electrodului măsurat (fig. 2 și 5).

16. Electrozi de referință¹⁾. a). *Electrodul de hidrogen.*

Comparația potențialului de electrod în studiu se face față de un electrod convențional de hidrogen, potențialul normal al electrodului de hidrogen fiind admis ca zero.

Electrodul de comparație de hidrogen se realizează la o presiune a hidrogenului de 760 mm col. Hg și activitatea ionilor de hidrogen în soluție egală cu unitate.

Electrodul se compune (fig. 3) dintr-un cilindru de sticlă cu gît, la care sînt racordate două tuburi pentru intrarea și ieșirea hidrogenului și un tub formînd

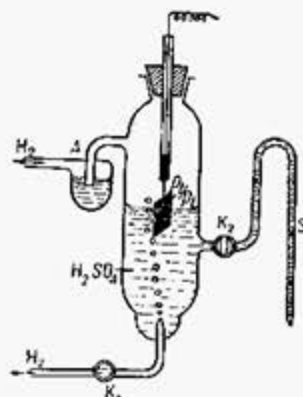


Fig. 3. — Electrodul de referință de hidrogen.

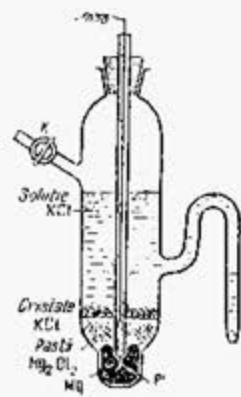


Fig. 4. — Electrodul de referință de calomel (cu soluție saturată).

un sifon S. O lamă de platină spongioasă (platină platinată) este cufundată cu partea sa superioară în atmosfera de H_2 la presiune de 760 mm col. Hg, iar cu partea sa inferioară într-o soluție de acid sulfuric avînd o concentrație de 1,008 g-ioni H^+ la litru (activitatea = 1).

Sifonul sau cheia electrochimică servește la stabilirea legăturii între sistemul studiat și electrodul de hidrogen. Această legătură se face prin intermediul unei soluții de electrolit (KCl , KNO_3 sau NH_4NO_3) care nu creează potențiale noi.

În electrodul de comparație, lama de platină adsorbe la suprafața sa hidrogen gazos, care, fiind în echilibru cu ionii H^+ din soluție conform ecuației:



formează electrodul gazos de hidrogen.

Practic, potențialul electrodului de hidrogen nu variază cu temperatura.

β) *Electrodul de calomel.* Un alt electrod de comparație este cel de calomel. Sistemul electrochimic al acestui electrod de ordinul 2 (v. § 7) este format din: $Hg|Hg_2Cl_2$ în soluție saturată $|KCl$ în soluție 1 N, sau 0,1 N, sau în soluție saturată.

¹⁾ Electrodul care este adoptat azi pretutindeni ca electrod cu potențial zero, este electrodul cu hidrogen. Cei alți electrozi de referință utilizați mai des (de calomel, de sticlă etc.) se etalonează în raport cu electrodul de hidrogen.

Față de electrodul de hidrogen, electrodul de calomel are un potențial normal de + 0,250 3 V (pentru o soluție saturată de KCl) la 18°C (fig. 4) (pentru $C_{KCl} = 0,1N$ $V^0 = + 0,337$ și pentru $C_{KCl} = 1N$ $V^0 = + 0,284$).

γ) *Electrodul din cadmiu metalic.* În industria acumulatorilor de plumb se utilizează un electrod de referință din cadmiu metalic, sub forma unor baghete cu diametrul de 3—10 mm, lungi de 25—100 mm. Baghetele sînt introduse în tuburi perforate de ebonită, care izolează electrodul de cadmiu de plăcile acumulatorului, permițînd însă accesul liber al electrolitului pînă la cadmiu. Ca și în cazul electrodului de calomel, se ține seama de valoarea potențialului normal al cadmiului (în soluție acidă) față de electrodul de hidrogen $V_{Cd}^{0++} = - 0,401$ V.

În cazul acumulatorilor alcaline, în locul electrodului de cadmiu se întrebuințează un electrod auxiliar de zinc, avînd un potențial $V_{Zn}^{0++} = - 1,3$ V (în soluție de 5,5 N KOH) față de electrodul de hidrogen.

17. *Potențialul normal (standard) de electrod* este potențialul unui electrod măsurat față de electrodul normal de hidrogen, concentrația în soluție a cationilor liberi (hidratați) ai electrodului considerat, fiind egală cu un gram-ion la litru (activitatea $a = 1$).

În multe cazuri, comparația se face însă față de electrodul de calomel.

18. *Șirul potențialelor normale de electrod.* Ordonarea succesivă a metalelor după mărimea și semnul potențialelor normale de electrod formează șirul potențialelor (standard). În acest șir, potențialul hidrogenului este considerat egal cu zero (tabela 1).

Tabela 1. Potențiale normale de electrod (activitatea ionilor = 1; temperatura 25°C)

Formarea cationilor	Electrod de referință		Formarea cationilor	Electrod de referință	
	Calomel	Hidrogen		Calomel	Hidrogen
Li/Li^+	-3,30	-3,02	As/As^{+++}	+0,02	+0,3
K/K^+	-3,20	-2,92	Cu/Cu^{++}	+0,06	+0,344
Ca/Ca^{++}	-3,16	-2,88	Co/Co^{++}	+0,12	+0,4
Ba/Ba^{++}	-3,08	-2,8	Cu/Cu^+	+0,24	+0,52
Na/Na^+	-2,99	-2,71	Ag/Ag^+	+0,52	+0,8
Mg/Mg^{++}	-2,68	-2,4	$2Hg/Hg_2^{++}$	+0,52	+0,8
Mn/Mn^{++}	-1,28	-1,0	Hg/Hg^{++}	+0,58	+0,86
Zn/Zn^{++}	-1,04	-0,76	Au/Au^{+++}	+1,08	+1,36
Cr/Cr^{++}	-0,83	-0,55	Au/Au^+	+1,22	+1,5
Cr/Cr^{+++}	-0,78	-0,5	Formarea anionilor		
Fe/Fe^{++}	-0,71	-0,43	$Te solid/Te^{--}$	-1,09	-0,91
Cd/Cd^{++}	-0,63	-0,4	$Se \text{ , } /Se^{--}$	-1,06	-0,77
Co/Co^{++}	-0,54	-0,26	$S \text{ , } /S^{--}$	-0,83	-0,53
Ni/Ni^{++}	-0,50	-0,22	$J_2 \text{ , } /2J^{--}$	+0,26	+0,54
Pb/Pb^{++}	-0,43	-0,126	$Br_2 lich./2Br^{--}$	+0,42	+0,54
Su/Su^{++}	-0,38	-0,10	$Cl_2 gaz./2Cl^{--}$	+1,08	+1,36
Fe/Fe^{+++}	-0,32	-0,04	$F_2 gaz./2F^{--}$	+2,56	+2,84
$H_2/2H^+$	-0,28	±0,00			
Bi/Bi^{+++}	-0,08	+0,2			
Sb/Sb^{+++}	-0,04	+0,24			

Semnele potențialelor sint convenționale. Astfel, electrodul este pozitiv cînd, fiind legat cu electrodul de hidrogen, are o sarcină pozitivă (de exemplu cuprul este pozitiv, iar zincul negativ). Această notație este utilizată în R.P.R.

S-a propus să se considere potențialul de electrod cu semnul pozitiv, dacă reacția la electrod decurge fără aport de energie din exterior (în acest caz, cuprul va fi electronegativ, iar zincul electropozitiv). Această notație este mai fundată din punct de vedere termodinamic și capătă o răspundere din ce în ce mai largă.

Au fost de asemenea măsurate potențialele care apar în urma reacțiilor de oxidare-reducere pe un electrod neutru (electrod de ordinul 3) în comparație cu potențialul normal al hidrogenului (v. tabela 2 și § 7 γ).

Tabela 2. Potențiale normale ale electrozilor de oxidare-reducere (activitatea ionilor = 1; temperatura 25°)

Procese de oxidare-reducere	Potențial V
$H_2(g) + 2OH^- \rightarrow 2H_2O$	-0,829
$Pb + 2OH^- \rightarrow Pb(OH)_2$	-0,576
$Cr^{3+} \rightarrow Cr^{6+}$	-0,400
Cu în soluție 1N NaOH	-0,1
$Cu^+ \rightarrow Cu^{2+}$	+0,16
$PbO(s) + 2OH^- \rightarrow PbO_2 + H_2O$	+0,27
$4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2$	+0,401
$Fe(CN)_6^{4-} \rightarrow Fe(CN)_6^{3-}$	+0,436
$MnO_4^{2-} \rightarrow MnO_4^-$	+0,634
$Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$	+0,748
$Hg_2^{2+} \rightarrow 2Hg^{2+}$	+0,901
HNO ₃ (soluție 6%)	+0,91
HNO ₃ (soluție 35%)	+1,09
HNO ₃ (soluție 95%)	+1,16
1 mol CrO ₃ în 1 l H ₂ SO ₄	+1,2
$Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2(s) + 4H^+$	+1,332
MnO_2 în soluție 0,5N H ₂ SO ₄ + 0,05 N MnSO ₄	+1,46
$Mn^{2+} + 4H_2O \rightarrow MnO_4^- + 8H^+$	+1,48
$Mn^{2+} \rightarrow Mn^{4+}$	+1,576
$MnO_2 + 2H_2O \rightarrow MnO_4^- + 4H^+$	+1,586
PbO ₂ în soluție 1N H ₂ SO ₄ , saturat cu PbSO ₄	+1,59
$Mn^{3+} \rightarrow Mn^{4+}$	+1,643
$PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-}$	+1,690
$Pb^{2+} \rightarrow Pb^{4+}$	+1,75

19. Calculul termochimic al f.e.m. Forța electromotoare poate fi calculată cunoscînd efectul termic al reacției generatoare de curent, conform relației termochimice (termodinamice) Gibbs-Helmholtz (v. § 6):

$$E = \frac{\theta}{0,24 nF} + T \frac{dE}{dT} = \frac{\theta}{23 060 n} + T \frac{dE}{dT}, \quad (19.1)$$

sau în formă simplificată (formula Thomson), care nu ține seama de schimbul de căldură cu exteriorul:

$$E = \frac{\theta}{23 060 n}, \quad (19.2)$$

în care: θ este căldura de reacție, în cal/mol;

$\frac{dE}{dT}$ — coeficientul de temperatură al elementului galvanic, în V/°K.

Formula (19.1) dă rezultate mult mai apropiate de cele măsurate decît formula (19.2), după cum se vede din tabela 3.

Tabela 3. Valorile f.e.m. măsurate și calculate

Element galvanic	E măsurată	E calculată după Gibbs	E calculată după Thomson
Cu CuSO ₄ ZnSO ₄ PbSO ₄ Pb	0,61	0,608	0,383
Hg Hg ₂ Cl ₂ ZnCl ₂ PbCl ₂ Pb	0,54	0,5	0,434
Pb PbSO ₄ ZnSO ₄ Zn	0,5	0,506	0,697
Hg Hg ₂ Cl ₂ KCl AgCl Ag	-0,96	-0,992	0,09

Suma celor doi termeni din ecuația Gibbs-Helmholtz reprezintă variația energiei libere a sistemului considerat. Se vede deci că dacă termenul $\frac{dE}{dT}$ este pozitiv, energia furnizată de sistemul considerat (de exemplu elementul galvanic)

Tabela 4. Relația dintre căldura de reacție și lucrul maxim

	Sistem electrochimic	E la 0°C V	A = 0,24nFE cal	θ cal	$\frac{dE}{dT}$ V/grad	Efectul caloric q în calorii calculat din	
						$\frac{dA}{dT} T$	$\theta - A$
1	Zn ZnSO ₄ saturat Cu CuSO ₄ saturat	1,093 4 (15°C)	50 400	55 200	-4,3 · 10 ⁻⁴	+5 690	+4 800
2	Cu Cu(CH ₃ COO) ₂ + nH ₂ O Pb Pb(CH ₃ COO) ₂ + 100H ₂ O	0,476 4	21 960	16 520	+3,85 · 10 ⁻⁴	-4 940	-5 440
3	Ag AgCl Zn ZnCl ₂ + 50H ₂ O	1,017 1	46 900	49 080	-2,1 · 10 ⁻⁴	-2 640	+2 190
4	Hg Hg ₂ (Cl ₂ + 0,1N KCl Hg Hg ₂ O + 0,01N KOH	0,148 3	7 570	3 290	+8,37 · 10 ⁻⁴	-11 280	-10 850

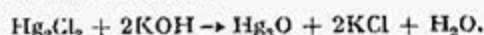
este mai mare decît energia reacției (tabela 4). Acest element împrumută la descărcare energie (căldură) din mediul ambiant. Acesta de altfel este cazul majorității surselor electrochimice industriale.

Relația dintre căldura de reacție Q și lucrul maxim A , determinat de reacție la diferite sisteme electrochimice (v. § 6):

$$A = 0,24 nFE = Q - \frac{dA}{dT} T = Q - q^1),$$

este exemplificată în tabela 4²⁾.

Sistemele electrochimice 1 și 3, funcționând, degajă căldură în exterior; pilele 2 și 4, în aceleași condiții, absorb căldură din mediul exterior. Sistemul electrochimic 4, care a fost propus de Bugarski, având următoarea reacție generatoare de curent:



prezintă caracteristici foarte interesante: $Q = -3280$ cal/mol (reacția este endotermică) și $A = 7570$ cal/mol. El primește deci de la mediul exterior atât energia necesară efectuării reacției generatoare de curent, cât și aceea corespunzătoare lucrului extern produs de pilă, adică în total 11280 cal/mol. Nu s-au realizat însă modele industriale ale unor astfel de sisteme electrochimice³⁾.

20. Tensiunea la bornele sursei electrochimice în regim de generator (la descărcare), când ea debitează un curent care nu este neglijabil, este diferită de cea calculată pe baza reversibilității termodinamice din cauza căderii interioare de tensiune și a pierderilor prin fenomene de polarizare:

$$U_d = E - E_p - Ir; \quad (20.1)$$

în regim de receptor (la încărcare):

$$U_i = E + E_p + Ir, \quad (20.2)$$

în care: E este f.e.m. produsă de sursa electrochimică;

E_p — o mărime care se poate reprezenta ca o forță contraelectromotoare și care este datorată fenomenelor de polarizare;

r — rezistența interioară a sursei;

I — curentul care traversează sistemul considerat.

Tensiunea elementului nu este o mărime constantă; ea depinde de procesele care au loc în element după legarea la circuitul exterior.

¹⁾ q este căldura pe care o absoarbe sau o elimină sistemul în mediul exterior, la efectuarea lucrului.

²⁾ Lucrul maxim A , determinat de reacție și căldura de reacție (de formare) Q sînt date de tabelele termodinamice de obicei pentru temperatura de 25°C (298°K) considerată ca temperatură standard.

³⁾ Studii asupra aplicabilității legilor termodinamice la pilele galvanice au fost făcute la noi de Acad. prof. N. Vasilescu-Karpen, care a realizat și unele construcții originale ale pilelor cu electrozi gazeși. Deasemenea Acad. prof. R. Cernătescu și prof. Th. Ionescu, au cercetat unele aspecte teoretice ale acestei probleme.

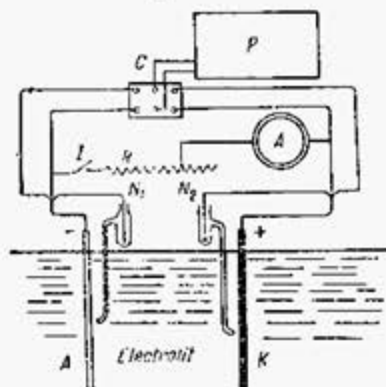


Fig. 5. — Schema dispozitivului de măsurare a potențialelor de electrod și a f.e.m. cu ajutorul electrodului de referință: N_1, N_2 — electrozi de comparație; R — eostat; A — ampermetru; I — întreruptor; C — comutator; P — potențiometrul.

21. Curbele caracteristice de descărcare și încărcare. Variația tensiunii în funcție de timpul de descărcare, respectiv încărcare, se reprezintă prin curbele:

$$U = f(t).$$

Mărimile care caracterizează aceste curbe sînt:

tensiunea inițială U_0 — tensiunea măsurată citeva secunde după legarea în circuitul exterior a elementului;

tensiunea finală U_f — valoarea convențională pînă la care este permisă descărcarea respectiv încărcarea elementului;

tensiunea medie U_m — se determină grafic sau analitic din curba $U = f(t)$, sau ca medie aritmetică a n citiri a tensiunii U , cuprinse între U_0 și U_f , la intervale de timp egale (v. și § 47):

$$U_m = \frac{1}{n} \sum U. \quad (21.1)$$

Tensiunea medie este aproximativ egală cu:

$$U_m = \frac{U_0 + 2U_f}{3}. \quad (21.2)$$

22. Funcționarea sursei electrochimice în regim de acumulator. O sursă electrochimică, legată în opoziție cu o sursă exterioră de curent continuu, începe să fie traversată de un curent în sens invers celui de funcționare ca generator, numai dacă i se aplică o tensiune minimă, denumită tensiunea de încărcare.

Tensiunea de încărcare corespunde tensiunii de descompunere, cunoscută din electroliză și este tensiunea minimă care trebuie aplicată la bornele unui electrolizor pentru a amorsa procesul de transformări electrochimice la electrozii electrolizorului.

Mărimea tensiunii de încărcare U_i , depinde în primul rînd de mărimea f.e.m. a sursei electrochimice cu care este în opoziție. În condiții de reversibilitate ea întrece numai cu o mărime infinit mică f.e.m. a elementului dat:

$$U_i \geq -(E) \geq -(V_K - V_A) \geq V_A - V_K. \quad (22.1)$$

Relația (22.1) arată că se inversează nu numai sensul curentului care traversează elementul galvanic (acumulator) dar și sensul reacțiilor la cei doi electrozi: catodul devenind anod, iar anodul — catod. Astfel la acumulatoare, denumirile de catod și anod sînt înlocuite prin electrodul negativ și electrodul pozitiv și anume: electrodul negativ este electrodul care funcționează ca anod (reacția de oxidare v. § 1 și 6), la descărcare și catod (reacția de reducere) la încărcare, iar electrodul pozitiv este electrodul care funcționează ca anod la încărcare și catod la descărcare.

Relația (22.1) este valabilă numai dacă diferența dintre tensiunea exterioră și f.e.m. a elementului galvanic este foarte mică, iar procesele la electrozi decurg în condiții foarte apropiate de cele ale reversibilității termodinamice.

Cînd tensiunea exterioră este apreciabil mai mare decît f.e.m. a elementului galvanic, în expresia tensiunii de încărcare intervin și pierderi:

$$U_i \geq E + E_p + Ir.$$

Ea se mai poate scrie sub forma:

$$U_i \geq E + I \left(\frac{E_p}{I} + r \right) \geq E + Ir_a, \quad (22.2)$$

în care r_a este rezistența totală a sursei electrochimice (v. § 27) care înglobează rezistențele ohmice și procesele lente datorate polarizării electrozilor.

23. Succesiunea proceselor la electrozi. În sistemele electrochimice conținând ioni de natură diferită, pot avea loc mai multe procese primare catodice și anodice. Pentru a stabili care din aceste procese vor avea loc, ne servim de valorile potențialelor reversibile de electrod (tabela 1).

Cazul cationilor. La catod, cufundat în soluție care conține diferiți cationi, primul se va descărca cationul care în condițiile date are un potențial de descărcare (de electrod) cel mai pozitiv. De exemplu, în prezența simultană în soluție a ionilor de cupru, hidrogen și argint, primul se va descărca ionul de argint al cărui potențial este mai pozitiv, deoarece:

$$V_{Ag}^{0+} = +0,8 \text{ V} > V_{Cu}^{0+} = +0,344 \text{ V} > V_{H}^{0+} = \pm 0 \text{ V}^1)$$

(considerând concentrațiile acestor ioni egale cu un echivalent-gram la litru).

La anod, când acesta conține metale diferite, primii vor trece în soluție cationii metalului cu un potențial de dizolvare (de electrod) cel mai negativ în condițiile date. De exemplu, un anod conținând zinc și plumb, va trimite în soluție în primul rând ionii de zinc, deoarece:

$$V_{Zn}^{0+} = -0,76 \text{ V} < V_{Pb}^{0+} = -0,126 \text{ V}^1)$$

(pentru concentrația ionică egală cu 1 echivalent-gram la litru).

Cazul anionilor. La catod se vor forma în primul rând anionii cu potențialul de electrod cel mai pozitiv. De exemplu în prezența simultană în soluție a clorului și oxigenului, primul se va ioniza clorul, deoarece:

$$V_{Cl}^{0-} = +1,36 \text{ V} > V_{OH}^{0-} = \pm 0,41 \text{ V}^1)$$

(concentrațiile ionice fiind normale).

La anod, fiind prezenți ionii de clor și de hidroxid, se vor descărca primii ionii OH^- , ca fiind mai puțin pozitivi (mai negativi) decât ionii Cl^- .

Această ordine (preferențială) a proceselor (reversibile) la electrozi se modifică în multe cazuri, când electrozii sînt traversați de un curent care nu mai este neglijabil, adică atunci când electrozii se polarizează.

24. Polarizarea. Polarizarea electrozilor constă în modificarea valorii potențialelor de electrod față de valoarea pe care o au în cazul procesului reversibil (stare de echilibru).

Fenomenul de polarizare ia naștere în momentul când începe circulația curentului și are ca efect modificarea f.e.m. reversibile a sistemului, cu o mărime care se numește deseori f.e.m. de polarizare.

Electrozii, ai căror potențial se modifică prin trecerea curentului, se numesc electrozi polarizați. Curentul de polarizare este curentul observat la legarea în scurtcircuit a electrozilor polarizați. Într-un sistem generator de curent, variația față de starea de echilibru a potențialelor catodului și anodului în timpul polarizării se petrece astfel:

¹⁾ Când sursa electrochimică funcționează în condiții de reversibilitate termodinamică singurele procese posibile la electrozi sînt cele care contribuie la efectuarea de către sistemul electrochimic a lucrului maxim A (v. § 6):

$$A_{max} = n F E_{max} = n F (V_K^{max} - V_A^{min}).$$

— pe măsura creșterii intensității curentului, catodul devine mai negativ (polarizare catodică), iar anodul, mai pozitiv (polarizare anodică), cele două potențiale se apropie și f.e.m.¹⁾ (diferența între cele două potențiale) $E_0 = V_K^0 - V_A^0$ se micșorează (fig. 6, a), devenind:

$$U = V_A' - V_K' = E_0 - (\Delta V_K + \Delta V_A).$$

Într-un sistem receptor, fenomenele se inversează.

Datele experimentale arată următoarea evoluție a fenomenului polarizării (fig. 6, b) la catod (curba A):

- la început se produce o bruscă și rapidă variație a potențialului (în fracțiuni de secundă după închiderea circuitului);
- apoi, o variație mult mai lentă (secunde și minute);
- la sfîrșit, o variație foarte lentă.

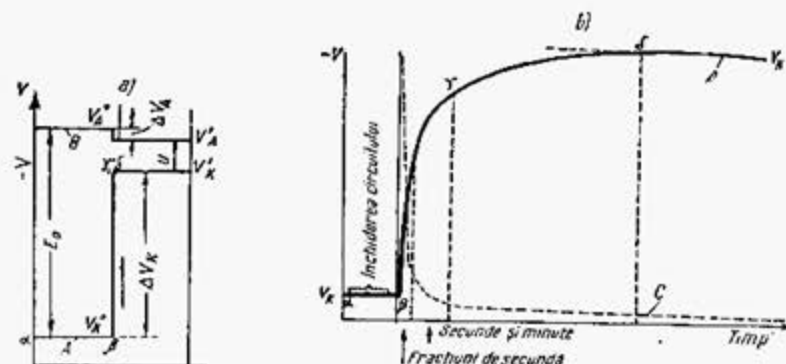


Fig. 6. — Diagrama procesului de polarizare a electrozilor: a — reprezentarea schematică a polarizării catodice (curba A) și anodice (curba B); E_0 — f.e.m. inițială (de echilibru); V_A^0 , potențialul de electrod inițial (de echilibru) al anodului; V_K^0 — idem al catodului; V_A' , potențialul de electrod al anodului polarizat; V_K' — idem al catodului polarizat; b — alura reală a curbelor de polarizare catodică $V = f(t)$, (curba A), și a variației densității de curent în timpul polarizării catodice $J = f(t)$, (curba C).

Sistemul poate ajunge la un echilibru, când modificarea potențialului nu mai are loc.

Se deosebesc trei feluri de fenomene de polarizare: α) de concentrație, β) chimică și γ) prin procesele lente la electrozi.

α) **Polarizarea de concentrație**, produsă de modificarea concentrației ionilor în soluția din imediata vecinătate a electrozilor față de concentrația de echilibru a ionilor din soluție. Ea se datorește faptului că la anod are loc trecerea ionilor din metal în soluție cu o viteză care depășește cea a difuziei, ceea ce mărește concentrația ionilor în stratul din imediata apropiere a anodului, iar la catod ionii se descărca în aceleași condiții, ceea ce micșorează concentrația lor. Dacă se consideră toate celelalte procese ca decurgînd fără polarizare, mărimea ΔV , cu

¹⁾ S'a considerat un element galvanic fără depolarizant la care ambii electrozi sînt constituiți din metale electronegative.

care s-a modificat potențialul de electrod la un moment oarecare al funcționării sursei electrochimice, se poate determina prin relația:

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\text{concentrația de echilibru a ionilor din soluție}}{\text{concentrația ionilor în zona electrodului polarizat}} \quad (24.1)$$

Viteza celor două reacții la electrozi depinzând de densitatea curentului, ΔV se poate exprima și prin relația:

$$\Delta V = \frac{RT}{nF} \ln \frac{J_d}{J_d - J} \quad (24.2)$$

în care:

J este densitatea de curent a procesului considerat;

J_d — densitatea de curent limită corespunzătoare punctului α al curbei $V = f(J)$, (fig. 7a).

În cazul catodului J_d reprezintă viteza maximă (limită) cu care se pot descărca ionii în condițiile date. J_d depinde de concentrația ionilor C și de valența lor n :

$$J_d = 0,018 \dots 0,025 nC \text{ (A/cm}^2\text{)}. \quad (24.3)$$

Coefficientul numeric din formula (24.3) ține seama de coeficientul de difuzie și numărul de transport al ionilor cum și de grosimea stratului de difuzie din soluția de electrolit.

β) Polarizarea chimică este produsă de modificarea compoziției electrolitului sau a electrozilor, prin formarea combinațiilor coordinative (complexe) ceea ce micșorează concentrația ionilor activi în soluție, prin producerea stării de pasivitate totală sau parțială a electrozilor etc.

γ) Polarizarea prin procese lente la electrozi este datorită frinării în timp a proceselor la electrozi. Se produce mai ales la descărcarea ionilor de hidrogen, hidroxil (oxigen), sau de metale din grupa fierului. Aceste fenomene de frinare poartă numele de supratensiune.

25. Supratensiunea hidrogenului. La descărcarea ionilor de hidrogen pe anumite metale, apare la catod o forță de frinare care se opune trecerii hidrogenului din stare ionică în stare atomică. Ca urmare a acestui proces apare o diferență între potențialul de echilibru al catodului și potențialul lui de funcționare (la care are loc descărcarea ionilor).

Cantitativ, fenomenul este prezentat prin relația:

$$\Delta V'_{H_2} = V_x - V_{H_2} \quad (25.1)$$

în care: $\Delta V'_{H_2}$ este supratensiunea hidrogenului;

V_x — potențialul de descărcare a hidrogenului când are loc supratensiunea pe electrodul considerat;

V_{H_2} — potențialul de echilibru al electrodului de hidrogen, în condițiile de funcționare fără supratensiune (de exemplu cu electrod de platină platinată).

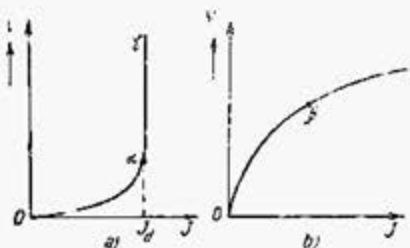


Fig. 7. — Curbele caracteristice ale polarizării catodice:

a — de concentrație; b — prin frinarea descărcării ionilor (supratensiune). Punctele α și β indică limitele pînă la care fenomenul este important.

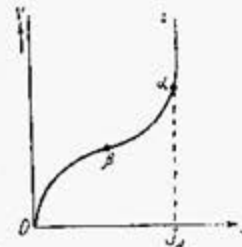


Fig. 8. — Curba caracteristică a polarizării catodice combinate (prin concentrație și supratensiune) stabilită prin unirea porțiunilor de curbe din fig. 7, a și 7, b pînă la punctele α și β .

Supratensiunea hidrogenului depinde de următorii factori: starea suprafeței, temperatură, densitatea curentului, și de timpul cît durează procesul.

Relația dintre supratensiunea hidrogenului și densitatea de curent (fig. 7b) este dată de formula:

$$\Delta V'_{H_2} = a + b \lg J, \quad (25.2)$$

în care: a este o constantă pentru electrodul dat; $a = \Delta V'_{H_2}$ cînd $J = 1 \text{ A/cm}^2$

(tabela 5);

b — o constantă; $b = 0,11 - 0,12$;

J — densitatea de curent, în A/cm^2 .

La majoritatea electrozilor din metale electropozitive¹⁾, se observă între limitele 1°C și 30°C o micșorare a valorii potențialului față de cea a potențialului de echilibru cu aproximativ $2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$.

Cauza supratensiunii este aglomerarea la catod a ionilor de hidrogen (încărcați pozitiv), ceea ce mărește potențialul negativ al catodului.

Conform teoriei lui A. N. Frumkin (U.R.S.S.), această aglomerare a ionilor de hidrogen învelișul exterior al stratului dublu al soluției din zona electrodului se datorește vitezei inegale (diferite) a procesului de descărcare a ionilor de hidrogen pe diverse metale (v. tabela 5). Procesul este cel mai lent pe metalele ca plumb, zinc, mercur, etc., care au deci valori mari a supratensiunii hidrogenului.

Supratensiunea hidrogenului joacă un rol important în funcționarea surselor de energie electrochimică. Datorită acestui fenomen se pot descărca la catod ionii de plumb, care în condițiile de echilibru au un potențial de electrod mai negativ decît ionii de hidrogen, făcînd astfel posibilă încărcarea acumulatorului de plumb.

În cele mai multe cazuri polarizarea gazoasă este însoțită de polarizarea de concentrație (fig. 8), prima fiind importantă la densități de curent mici (porțiunea „ $\theta\beta$ ” a curbei $V = f(J)$, iar a doua la densități de curent mari, porțiunea „ $\beta\alpha\gamma$ ”.

26. Supratensiunea oxigenului. Valoarea potențialului normal al electrodului de oxigen la $\text{pH} = 14$ este $+0,41 \text{ V}$.

Tabela 6. Supratensiunea hidrogenului

Intensitatea curentului, mA/cm ²	Supratensiunea, într-o soluție de H ₂ SO ₄ (2N) la 25°C						
	Pt spongiosă	Pt metalică	Au	Fe	Cu	Pb	Zn
0,1	-0,008	-	-0,122	-0,218	-0,351	-	-
1	-0,015	-0,024	-0,241	-0,403	-0,479	-0,479	-0,716
10	-0,030	-0,068	-0,390	-0,557	-0,584	-1,090	-0,746
100	-0,040	-0,288	-0,588	-0,818	-0,801	-1,179	-1,064
1 000	-0,048 *)	-0,676 *)	-0,798 *)	-1,291 *)	-1,254 *)	-1,262 *)	-1,229 *)
1 500	-0,049	-0,768	-0,807	-1,290	-1,269	-1,290	-1,243

*) Reprezintă valoarea constantei „ a ” din formula (25.2).

¹⁾ v. § 18.

Cunoscând concentrația ionilor OH^- în soluție, se poate calcula valoarea teoretică a potențialului de descărcare a ionilor hidroxil, adică a degajării oxigenului.

Dar anodul — pe care se produce, în timpul electrolizei, degajarea de oxigen — are totdeauna un potențial mai electropozitiv, adică degajarea oxigenului la anod produce de asemenea o supratensiune.

Supratensiunea oxigenului reprezintă diferența dintre potențialul electrodului în condițiile date și potențialul teoretic al electrodului de oxigen în aceeași soluție (tabelele 6 și 7).

Tabela 6. Supratensiunea oxigenului

Intensitatea curentului, mA/cm ²	Supratensiunea într-o soluție de H_2SO_4 (1N)						
	Au	Pt netedă	Ag	Pb	Fe	C	C
2	0,87	0,85	—	0,91	0,75	—	0,45
10	0,87	0,86	—	0,98	0,75	—	0,61
100	0,82	0,86	0,74	1,05	0,73	0,62	0,83
1 000	0,77	0,86	0,74	1,05	0,67	0,62	0,90
2 000	0,75	0,87	0,72	1,04	0,63	0,68	0,88

Tabela 7

Intensitatea curentului, mA/cm ²	Supratensiunea într-o soluție de NaOH (1N)									
	Au	Pt netedă	Ag	Pb	Fe	Ni	C	Cu	Zn	Sn
2	0,96	0,85	—	0,86	0,44	0,49	0,62	0,57	—	1,22
10	0,96	0,87	0,70	0,95	0,49	0,57	0,47	0,63	—	1,35
100	0,91	0,98	0,72	0,95	0,51	0,65	0,79	0,61	1,00	1,33
1 000	1,17	0,90	0,71	0,92	0,52	0,67	0,88	0,58	1,78	—

Supratensiunea oxigenului ca și a hidrogenului depinde de starea suprafeței electrodului și de impuritățile pe care acesta le conține; valoarea sa variază cu timpul.

Supratensiunea oxigenului are și ea un rol însemnat în procesele electrochimice ale acumulatorilor de plumb și alcaline, deoarece ionii hidroxil participă la formarea în timpul încărcării a bioxidului de plumb, respectiv a bioxidului de nichel.

27. Rezistența interioară totală a elementelor galvanice. Rezistența interioară a elementului galvanic este rezistența pe care acesta o opune la trecerea curentului continuu.

Dacă în relația (22.2):

$$U_i = E + I \left(\frac{E_p}{I} + r \right)$$

se notează:

$$r + \frac{E_p}{I} = r_a, \quad (27.1)$$

tensiunea la bornele elementului galvanic devine:

$$U_i = E + I \cdot r_a. \quad (27.2)$$

Mărimea r_a se numește rezistența interioară totală. Ea se compune din două mărimi: o rezistență ohmică r care înglobează rezistența soluției de electrolit, a electrozilor etc. și încă o mărime, care are dimensiunile unei rezistențe $\frac{E_p}{I}$ și

care depinde de l.e.m. de polarizare și de intensitatea curentului de polarizare. Mărimea r_a este denumită uneori și «rezistența aparentă». Ea are valori diferite la încărcare față de cele la descărcare (deoarece E_p este diferită).

Fenomenele de polarizare care influențează rezistența interioară totală au fost tratate în §24.

În ceea ce privește componentele rezistenței ohmice, ele participă în mod inegal la mărimea ei. Electrozii fiind din metal sau din cărbune grafitat (conductori electronici) au o rezistivitate mică în comparație cu soluțiile de electroliti (conductori ionici). Astfel rezistența ohmică a sursei se compune aproape exclusiv din cea a electrolitului.

Caracterizarea electrolitului din punct de vedere al conductibilității electrice se face de obicei nu prin indicarea rezistivității ci a conductivității soluției electrolitice. Conductibilitatea conductorilor ionici ca și a celor electronici este supusă legii lui Ohm. Conductivitatea ionică se notează de obicei prin σ (spre deosebire de cea electronică care se notează cu γ).

Deoarece transportul curentului în electroliti se face prin deplasarea ionilor, conductivitatea soluției electrolitice este cu atât mai mare cu cât este mai mare concentrația ionică și viteza ionilor sub acțiunea cîmpului electric aplicat:

$$\sigma = \alpha C_0 F (u_+ + u_-). \quad (27.3)$$

în care: σ este conductivitatea soluției electrolitice în $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$;

α — gradul de disociere a moleculelor electrolitului;

C_0 — concentrația electrolitului în ech-g/ml solvent;

F — numărul lui Faraday;

u_+ și u_- — mobilitățile ionilor pozitivi respectiv negativi $\left(\text{în } \frac{\text{cm}}{\text{s}} / \frac{\text{V}}{\text{cm}} \right)$, definite ca reprezentînd raportul dintre viteza ionilor și intensitatea cîmpului electric aplicat $\left(u = \frac{v}{E} \right)$.

Altfel concentrația ionică a soluției cit și mobilitățile ionilor pot fi determinate experimental sau prin calcul. Concentrația ionică c se calculează prin relația simplă:

$$c = C \alpha n,$$

în care: C este concentrația substanței dizolvate în soluție;

α — gradul de disociere a moleculelor;

n — numărul de ioni care se formează dintr-o moleculă disociată.

Calculul mobilității ionilor se face pe baza teoriei cinetice a gazelor și nu este tratat aici deoarece în acest capitol ne servim de datele experimentale ale conductivității electrolitelor la diverse concentrații ale soluțiilor apoase.

Variația conductivității cu concentrația ionilor în soluțiile apoase. Apa pură din cauza disociației foarte mici are o conductivitate foarte mică. Însă chiar la primele urme de acid, bază sau sare dizolvată în apă apare o conductivitate ușor măsurabilă, care crește pe măsura creșterii concentrației ionilor acestor substanțe. Însă cînd concentrația soluției devine suficient de mare (în cazul electrolitelor ușor solubili), gradul de disociere se micșorează, ceea ce poate să ducă la un moment

dat la descreșterea concentrației ionice, cu toată creșterea concentrației substanței dizolvate. În acest caz conductivitatea începe să descrească atunci când creșterea concentrației soluției continuă să crească (fig. 31).

Măsurarea rezistenței ohmice se face prin metoda punții de curent alternativ; rezistența totală sau aparentă se măsoară în curent continuu (v. § 56) prin metoda volt-ampmetrului, ea fiind dată de expresia:

$$r_a = \frac{E - U}{I} \quad (\text{în regim de descărcare}) \quad (27.4)$$

și:

$$r_a = \frac{U - E}{I} \quad (\text{în regim de încărcare}). \quad (27.5)$$

28. Capacitatea în Ah și energia înmagazinată în Wh a elementelor galvanice. Capacitatea elementului galvanic este cantitatea de electricitate pe care o poate furniza un element pus să se descarce, pînă la o tensiune finală fixată de condițiile de utilizare.

Deosebim capacitatea în cantitate de curent, exprimată în amperore C_{Ah} și capacitatea în energie exprimată în wattore C_{Wh} :

$$C_{Ah} = \int_0^t I_d dt \quad (28.1)$$

și:

$$C_{Wh} = U_m \int_0^t I_d dt, \quad (28.2)$$

în care: I_d este intensitatea curentului de descărcare;

t — timpul (durata) de descărcare;

U_m — tensiunea medie (§ 21).

Dacă descărcarea se face cu o intensitate de curent constantă:

$$C_{Ah} = It \quad (28.3)$$

și:

$$C_{Wh} = U_m It. \quad (28.4)$$

În mod practic, capacitatea acumulatorilor se încearcă la o descărcare cu intensitate de curent constantă, iar a elementelor galvanice pe o rezistență de descărcare constantă:

$$C_{Ah} = \frac{1}{R} \int_0^t U dt, \quad (28.5)$$

sau:

$$C_{Ah} = \frac{U_m t}{R} \quad (28.6)$$

și:

$$C_{Wh} = \frac{U_m^2 t}{R} \quad (28.7)$$

Capacitatea elementului este determinată de cantitatea de masă activă care ia parte la reacții din momentul începerii descărcării pînă la atingerea tensiunii finale admise. Această cantitate se poate calcula teoretic pe baza legii lui Faraday:

$$G = \frac{M}{nF} It; \quad (28.8)$$

în care: G este greutatea substanței care a suferit transformarea la electrod, în g;

n — valența reacției de transformare;

i — curentul, în A;

t — timpul, în s;

F — constanta lui Faraday $\approx 96\,500 \text{ C} \approx 26,8 \text{ Ah}$;

M — greutatea (masa) moleculară;

$\frac{M}{nF}$ — echivalentul electrochimic, în: $\frac{\text{mg}}{\text{C}}$ sau $\frac{\text{g}}{\text{Ah}}$.

29. Puterea elementelor galvanice. Puterea totală este dată de relația:

$$P_t = EI = I^2 R + I^2 r_a, \quad (29.1)$$

iar puterea utilă:

$$P_u = EI - I^2 r_a. \quad (29.2)$$

Puterea utilă maximă se obține când $R = r_a$. Atunci curentul va fi de asemenea maxim:

$$I_{\max} = \frac{E}{r_a}.$$

Energia pe care o poate furniza un element galvanic este:

$$W = C \cdot U.$$

Pentru a realiza o energie specifică¹⁾ cât mai mare, elementul galvanic trebuie să aibă o f.e.m. cât mai mare, o polarizare cât mai mică, o rezistență interioară mică și o cât mai mare capacitate specifică.

30. Realizarea f.e.m. maxime a elementului galvanic se face alegînd un sistem electrochimic constituit din substanțe care dau o reacție generatoare de curent cu efectul termic maxim (v. § 19).

Alegerea tipului electrozilor se poate face cu ajutorul tabeli potențialelor normale (v. tabela 1 și § 7, 8 și 18), cunoscînd că:

$$E = V_K - V_A = V_{(+)} - V_{(-)}.$$

Potențialele cele mai negative față de soluția apoasă a ionilor respectivi le au metalele alcaline, iar cele mai pozitive, metalele nobile. Astfel, elementul cu f.e.m. cea mai mare ar fi:

$$(-) \text{ Li } \left| \begin{array}{c} \text{Soluția} \\ \text{Sare Li} \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \text{Soluția} \\ \text{Sare Au} \end{array} \right| \text{ Au } (+),$$

avînd o f.e.m. $E = 1,36 - (-3,02) = 4,38 \text{ V}$.

¹⁾ Capacitatea elementului galvanic exprimată în Wh și raportată la o unitate de greutate (g. sau kg) sau la unitate de volum (dm³).

Realizarea practică a unui astfel de element este însă imposibilă, nu numai din cauza prețului ridicat al aurului sau al altui metal prețios (ca electrod pozitiv), dar și din cauza reacției energice cu apa a metalelor alcaline și alcalino-pămîntoase (la electrodul negativ).

Printre metalele cu potențiale negative mari, numai zincul a putut fi folosit în construcția curentă a anozilor elementelor galvanice (reacția anodică $Zn - 2e^- \rightarrow Zn^{++}$ produce un potențial de electrod $V_{Zn^{++}}^0 = -0.762$ V).

Potențialul pozitiv relativ mare îl are cuprul, care a putut fi folosit la fabricarea catodilor (reacția catodică $Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu$ produce un potențial $V_{Cu^{++}}^0 = +0.344$).

Pe acest cuplu electrochimic Zn - Cu se bazează primele elemente galvanice realizate.

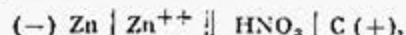
Întrebuințarea electrozilor de ordinul al treilea (v. § 7) în care soluția conține forma oxidată și redusă a unui anumit element chimic (de exemplu a cromului trivalent și hexavalent etc.), iar electrodul este inactiv, permite obținerea unor potențiale de electrod, ale căror mărime și semn depind de activitatea oxidantului.

Din tabela 2 se vede că cu diferiți oxidanți se pot realiza valori pozitive mari ale potențialelor de oxidare-reducere, care întrec cu mult pe acelea ale metalelor electropozitive, chiar cele nobile. De aceea sistemele de oxidare-reducere sînt întrebuițate ca electrozi pozitivi (catodi) în multe sisteme de elemente galvanice primare și secundare. Folosirea acestor electrozi permite eliminarea într-o mare măsură a polarizării gazoase a catodului (v. supratensiunea hidrogenului § 25).

Electrodul inert (neutru) în sistemul de oxidare-reducere este de obicei din grafit sau cărbune.

Realizarea f.e.m. maxime în elementele galvanice se face deci prin combinarea electrozilor metalici (de ordinul 1), pentru îndeplinirea reacțiilor anodice, cu electrozi de oxidare-reducere (de ordinul 3) pentru reacțiile catodice.

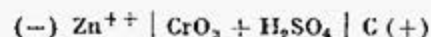
De exemplu, cuplul electrochimic format din:



va avea o f.e.m.:

$$E = +1,16 - (-0,762) = 1,922 \text{ V},$$

iar cuplul:



va avea o f.e.m.:

$$E = 1,59 - (-0,762) = 2,352 \text{ V}.$$

Mărimea potențialelor de electrod depinde nu numai de natura metalului sau de puterea oxidantului, dar și de concentrația ionilor care reacționează între ei — a se vedea relațiile (7.1) și (7.6).

Prin variația concentrației ionilor se poate mări sau micșora f.e.m. a aceluiași element. De exemplu, elementul Daniel-Iacobi. Când concentrațiile ionilor în soluție sînt normale (1N), sistemul fiind reprezentat prin:



potențialele celor doi electrozi sînt și ele normale și anume (v. tabela 1):

$$V_{Zn^{++}}^0 = V_{Zn^{++}}^0 = -0,762 \text{ și } V_{Cu^{++}}^0 = V_{Cu^{++}}^0 = +0,344,$$

În aceste condiții f.e.m. este:

$$E = V_K - V_A = 1,102 \text{ V}.$$

Dacă însă anodul de zinc se găsește în soluția 0,1N a sării complexe de zinc $K_2Zn(CN)_4$, în care concentrația ionilor de zinc Zn^{++} este foarte mică (10^{-9} g-ion/l), potențialul de electrod al zincului, conform formulei (7.1), va fi egal cu 1,032 V și f.e.m. a elementului va fi de 1,372 V în loc de 1,1 V.

31. Capacitatea maximă. Capacitatea pe care o poate da materia activă dintr-un element galvanic depinde de echivalentul ei electrochimic și de numărul valențelor angajate în reacție.

Masele teoretice ale substanțelor active necesare pentru a produce un Ah sînt arătate în tabela 8.

Tabela 8

Materiile active		Grame pentru 1 Ah	Ah pentru 1 kilogram de materie activă
pozitive			
PbO ₂	trezind în stare de PbSO ₄	4,46	224,2
1/2 O ₂	" "	0,30	3 333,3
CuO	" "	1,48	675,2
Cu ₂ O	" "	2,83	351,0
Ni ₂ O ₃	" "	3,07	325,5
Mn(OH) ₂	" "	4,59	210,7
Cl	" "	1,33	754,1
AgCl	" "	5,35	186,9
negative			
Pb	trezind în stare de PbSO ₄	3,86	259,1
Zn	" "	1,22	821,6
H ₂	" "	0,037 4	26 742,2
Fe(OH) ₂	" "	3,36	297,5
Fe	" "	1,04	957,2
Zn	" "	1,22	821,6

Din tabela 8 se poate vedea, de exemplu, că elementul oxigen—hidrogen necesită numai 0,337 g pentru a produce 1 Ah, pe cînd elementul cu bioxid de mangan—zinc 5,81 g, iar acumulatorul (PbO₂ — Pb) de plumb 8,32 g. Sistemul O₂—H₂ ca și sistemul C—O₂ (carbon-oxigen) formează baza pililor de combustie în care se realizează arderea electrochimică a combustibililor. Studiul acestor pile se face azi în multe laboratoare.

32. Coeficientul de utilizare a maselor active. Cantitatea de masă activă introdusă real într-o sursă electrochimică de energie electrică întrece cu mult pe cea teoretică, deoarece în timpul descărcării nu toată masa activă poate lua parte la reacție.

Raportul dintre greutatea teoretică a masei active și greutatea ei reală este coeficientul de utilizare a masei active. El se indică de obicei în procente.

În unele cazuri de întrebuințare a surselor electrochimice, greutatea totală sau volumul elementului joacă un rol important. Pentru aceasta s-au introdus următoarele notații ale capacităților specifice:

$$\frac{C_{Ah \text{ sau } Wh}}{kg} \text{ — capacitatea specifică de masă (în greutate);} \quad (32.1)$$

$$\frac{C_{Ah \text{ sau } Wh}}{dm^3} \text{ — capacitatea specifică de volum.} \quad (32.2)$$

33. Randamentul elementelor galvanice secundare (la acumulatoare) este raportul dintre cantitatea de electricitate sau de energie debitată la descărcare și cantitatea de electricitate sau de energie primită la încărcare. Se deosebește randamentul în cantitate de electricitate η_{Ah} și randamentul în energie η_{Wh} :

$$\eta_{Ah} = \frac{C_{Ah\ desc}}{C_{Ah\ inc}} \quad (33.1)$$

$$\eta_{Wh} = \frac{C_{Wh\ desc}}{C_{Wh\ inc}} \quad (33.2)$$

Randamentul este totdeauna mai mic decât unitatea, deoarece o parte din capacitatea primită la încărcare se pierde din cauza diverselor procese secundare și în special din cauza procesului de electroliză a apei, greu de evitat în soluțiile apoase.

34. Autodescărcarea este pierderea nerecuperabilă a capacității elementului — atât în circuit deschis cât și cu circuit exterior închis, — ca urmare a unor procese interne ale pilei. Autodescărcarea poate fi normală sau accelerată.

Autodescărcarea normală este produsă de procesul normal de interacțiune între electrod și electrolit. Ea variază între limitele de 0,01—1% din capacitatea totală în 24 ore.

Autodescărcarea accelerată se datorește impurităților din electrozi sau din electrolit și poate atinge valori mari, fiind deci foarte dăunătoare funcționării elementului.

Ațit pentru pile cât și pentru acumulatoare este valabilă expresia:

$$K = \frac{C_1 - C_2}{C_1 \cdot m} 100\%, \quad (34.1)$$

în care: K este autodescărcarea în timp de 24 ore, din capacitatea la regimul de 10 ore, în procente;

C_1 — capacitatea obținută la ultima descărcare înainte de depozitare, în Ah;

C_2 — capacitatea obținută după depozitare, în Ah;

m — numărul zilelor (24 ore) de inactivitate a pilei sau acumulatorului.

35. Durata în serviciu sau durata de viață (la acumulatoare) se determină prin numărul ciclurilor sau al amper-orelor care pot fi obținute de la element.

Prin ciclu se înțelege o descărcare-încărcare completă (până la tensiunea finală admisă) a acumulatorului. Durata de viață depinde de construcția electrozilor și de o strictă conformare cu prescripțiile de funcționare indicate de uzina producătoare.

În condiții de întreținere bune durata de viață la acumulatoarele staționare este de câteva mii de cicluri, iar la cele transportabile ea este de numai 150—500 cicluri.

36. Condițiile impuse surselor electrochimice. Condițiile principale, care se impun surselor electrochimice de energie electrică, sînt următoarele:

— sistemul electrochimic care stă la baza funcționării elementului trebuie să aibă o f.e.m. cât mai mare;

— rezistența interioară a sursei trebuie să fie cât mai mică;

— cantitatea de energie electrică, pe care o poate furniza sursa raportată la un tate de greutate și de volum, trebuie să fie maximă;

— autodescărcarea, adică pierderea inutilă a capacității produsă de procesele parazitare interioare, trebuie să fie cât mai mică;

— durata de funcționare trebuie să fie cât mai mare;

— costul materialelor întrebunțate în construcția sursei trebuie să fie justificat de utilizarea sursei.

D. Elemente galvanice primare (pile)

37. Pila Volta sau pila elementară. Sistemul electrochimic este format din:

(—) Zn; | H₂SO₄ | Cu (+); f.e.m. = 0,85 ... 0,90 V.

Polarizarea catodului (Cu) este foarte puternică, din cauza supratensiunii hidrogenului. F.e.m. este mai mică decât suma algebrică a potențialelor normale ale celor doi electrozi (din cauza polarizării intense: electrodul de cupru este cufundat într-un electrolit care nu conține ioni de cupru etc.). Pila Volta este acum complet abandonată.

Construcțiile următoare de pile galvanice au la bază sisteme electrochimice care, fie că nu produc procese de polarizare, fie că folosesc aceste procese în sens favorabil funcționării lor (v. § 25 și 26).

38. Depolarizarea este un proces care creează condiții de menținere a tensiunii la borne la valori cât mai apropiate de cele de echilibru.

În pilele primare, fenomenul de polarizare este important mai ales la catod (polul pozitiv al pilei), fiind datorat în general prezenței ionilor de hidrogen.

a) *Depolarizarea fizică și mecanică.* Depolarizarea fizică și depolarizarea mecanică constau în prelucrarea suprafeței catodului (suprafețe spongioase) care atenuează supratensiunea gazoasă. Alte metode sînt agitarea sau circulația electrolitului pentru micșorarea polarizării de concentrație.

β). *Depolarizarea electrochimică* se obține prin introducerea în sistemul electrochimic a unor substanțe depolarizante; acestea dau naștere la procesele electrochimice, care reduc complet sau parțial variațiile de tensiune produse de fenomenele de polarizare.

După starea de agregare a substanțelor depolarizante întrebunțate, pilele pot fi împărțite în pile cu depolarizare: a) lichidă; b) solidă și c) gazoasă (aer).

γ) *Depolarizarea lichidă.* Se întrebunțază de obicei două soluții diferite (pile cu două lichide), una servind ca soluție de atac a anodului, iar cealaltă ca soluție depolarizantă (pila Bunsen). În alte cazuri însă, electrolitul depolarizant este amestecat cu electrolitul anodic (pila Grenet).

Dezavantajul pilelor cu depolarizant lichid cu doi electroliti provine din nevoia de a întrebunța vasul poros (diafragma) pentru separarea celor două soluții, ceea ce mărește rezistența interioară a pilei, iar la cele cu un singur electrolit procesul de autodescărcare este foarte intens din cauza transportului ionilor de la un electrod la altul.

δ) *Depolarizarea solidă.* Pentru a evita vasul poros, se întrebunțază depolarizanti solizi; depolarizarea însă nu este atât de completă ca la cei lichizi.

Se întrebunțază de preferință oxizii metalici capabili să se reducă ușor în soluții de electrolit. Acțiunea depolarizantă a acestor oxizi este foarte eficientă cînd ei formează însuși polul pozitiv (catodul) al pilei, sau sînt în contact cât mai direct cu acesta. În ultimul caz, hidrogenul se depune pe un corp oxidant și nu se produce decât o slabă polarizare. Dar acești oxizi au o conductibilitate electrică mică și utilizarea lor necesită introducerea corpurilor bune conducătoare în masa depolarizantă (pila Leclanché și acumulatoare alcaline-grafit etc.).

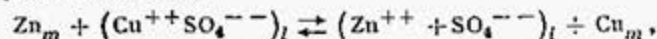
c) *Depolarizarea gazoasă* se face în genere folosind oxigenul din aer, care se combină la catod cu hidrogenul pe un electrod de cărbune care servește drept catalizator al acestor reacții.

39. Elemente galvanice cu depolarizant lichid. a) *Pile cu electroliți neutri. Pila Daniel-Iacobi (cupru-zinc).* Sistemul electrochimic al acestei pile este compus din:



Forța electromotoare rezultantă este $1,07 \div 1,08 \text{ V}$, contribuția potențialelor catodului și anodului fiind: $V_{\text{Cu}^{++}}^0 = +0,344 \text{ V}$ și $V_{\text{Zn}^{++}}^0 = -0,76 \text{ V}$.

Reacția de bază este:



indicii m și l simbolizând metalul (m) și soluția (l) (v. § 9).

Construcția. Modelul clasic (fig. 9) este format dintr-un vas de sticlă, în care se găsește un cilindru gol de tablă subțire de zinc (uneori amalgamat). În

interiorul cilindrului de zinc se găsește un vas de porțelan poros, care cuprinde electrodul de cupru. Compartimentul catodic (vasul poros) conține o soluție de sulfat de cupru cu o concentrație de 16%. În compartimentul anodic (vasul de sticlă) se găsește o soluție diluată de sulfat de zinc, cu o concentrație de 10%. Pe măsura debitării curentului, concentrația soluției de sulfat de cupru scade. Pentru menținerea constantă a concentrației, se așază pe fundul vasului, sau într-un mic coșuleț prins de electrodul de cupru, cristale de sulfat de cupru; pH-ul soluțiilor este aproximativ 5.

Din tabela 9 se vede că la catod, potențialul de electrod al cuprului este superior potențialului de descărcare al ionilor de hidrogen, astfel că singurul proces posibil este descărcarea ionilor de cupru. La anod, potențialul de ionizare al zincului prezintă valoarea negativă maximă. Procesul

care va decurge la anod va fi deci dizolvarea zincului. În aceste condiții, dacă concentrațiile ionice se mențin constante, polarizarea electrozilor are un caracter

Tabela 9. Procesele energetice într-un element galvanic cu depolarizant lichid

Procesele posibile	Lucrul maxim determinat de reacție: $A - W = nVF$
La catod:	
$\text{Cu}^{++} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	$W_{\text{Cu}} = 2(+0,35) F^1)$
$2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow 2\text{H} = \text{H}_2$	$W_{\text{H}_2} = 1(-0,29) F; (\text{pH} \approx 5)$
La anod:	
$\text{Zn} - 2e^- \rightarrow \text{Zn}^{++}$	$W_{\text{Zn}^{++}} = -2(-0,76) F^1)$
$2\text{HO}^- - 2e^- \rightarrow 2\text{HO} = \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$W_{\text{OH}} = -1(+0,83) F; (\text{pH} = 5)$

¹⁾ În calculul din tabelă s-a neglijat faptul că $C_{\text{Zn}} > 1N$ și $C_{\text{Cu}} > 1N$ și s-a aproximat V_{Cu} și V_{Zn} ca fiind egale cu V_{Cu}^0 și V_{Zn}^0 (v. § 6 și 23).

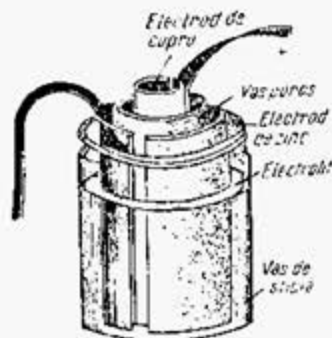


Fig. 9. — Pila cupru-zinc cu diafragmă (Daniel-Iacobi).

reversibil la densități de curent care depind de construcția elementului (suprafața electrozilor, distanța între electrozi ș.a.).

Dezavantajele pilei Daniel-Iacobi și modificările aduse. Rezistența relativ mare a celor două soluții de electrolit și a diafragmei face ca rezistența interioară a pilei să fie mare ($> 10 \Omega$). Prin aceasta, intensitatea maximă care poate fi debitată de această pilă este limitată la $0,1 - 0,2 \text{ A}$.

— Sulfatul de cupru, difuzând în compartimentul anodic, produce depunerea cuprului pe anodul de zinc, acoperindu-l. Acest lucru provoacă o autodescărcare considerabilă și un consum mare de zinc în stare de repaus.

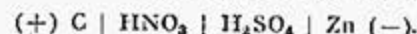
În construcțiile mai noi s-au introdus modificări menite a împiedica difuziunea sulfatului de cupru. Aceste modificări constau în acoperirea vasului poros cu o masă de hirtie tratată cu acid sulfuric, sau cu pastă de oxid de zinc¹⁾.

O variantă a pilei Daniel-Iacobi este *pila Meidinger* (fig. 10), în care s-a eliminat diafragma poroasă. Separarea soluțiilor se face prin diferența de densitate a celor două soluții. Această pilă a fost și este și azi mult întrebuințată în instalațiile de telegrafie.

Construcția. Soluția de sulfat de cupru, care este mai densă decât aceea de sulfat de zinc, este dispusă pe fundul vasului; pentru ca totuși difuziunea să fie cât mai redusă, s-a micșorat suprafața de contact a celor două soluții printr-o construcție corespunzătoare a pilei (fig. 10).

Concentrația soluției de CuSO_4 este menținută constantă prin dizolvarea treptată a cristalelor de CuSO_4 conținute într-o pilnie de sticlă de formă specială (pilnie), a cărei margine se sprijină pe vasul exterior. Elementul trebuie să fie staționar, trepidațiile și transportul puțin producă amestecarea celor două soluții. În construcțiile moderne s-a simplificat forma vasului și se întrebuințează uneori drept electrod pozitiv plumbul.

(3) *Pile cu electroliți oxidanți. Elementul cu acid azotic (Bunsen).* Sistemul electrochimic se bazează pe marea putere oxidantă a acidului azotic și este constituit dintr-un electrod de ordinul 1 (anod) și un electrod de ordinul 3:



Forța electromotoare este cuprinsă între $1,8 \dots 1,95 \text{ V}$. Reacția de funcționare este următoarea:



La anod se petrece procesul:

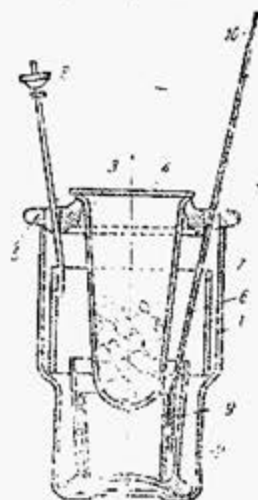


Fig. 10. — Pila cupru-zinc fără diafragmă:
1 — vas exterior de sticlă (spațiul anodic); 2 — pahar interior de sticlă (spațiul catodic); 3 — pilnie de sticlă; 4 — capac de ebonită; 5 — cristale de CuSO_4 ; 6 — electrod de zinc (anod); 7 — borna negativă; 8 — electrod de cupru (catod); 9 — bornă pozitivă.

¹⁾ Îmbunătățirea pilei Iacobi a fost făcută încă în secolul XIX de P. N. Iablojikov și Sosnovski. De asemenea P. R. Bagration adăugând nisip fin la elementul Iacobi, a realizat acest element, cu electroliți imobilizați.

Iar la catod:



La acest electrod reacția (red-ox) constă în schimbarea valenței (v. § 7 Y):



Potențialul de oxidare-reducere depinde de concentrația acidului azotic.

Pentru diferite concentrații se obține (v. tabela 2 cu potențialele de oxidare-reducere):



Depolarizarea este foarte activă, putând deveni și mai energică prin adăugarea de acid clorhidric, cromat de potasiu etc. Rezistența interioară a sistemului este de ordinul 0,1–0,2 Ω , foarte rar apropiindu-se de 1 Ω .

Construcția. Elementul se compune dintr-un vas exterior de sticlă și un vas interior – care constituie diafragma – de porțelan poros (fig. 11). În vasul poros, care formează compartimentul catodic, se găsește electrodul pozitiv (catodul) din cărbune și soluția de 35–50% acid azotic.

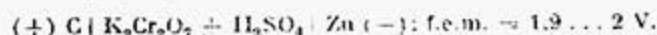
În vasul exterior – care constituie compartimentul anodic – se găsește electrodul negativ (anodul) din zinc amalgamat. Vasul este umplut cu soluție de acid sulfuric 30%.

Caracteristica acestui sistem este forța electromotoare mare, de circa 2 V și densitatea mare de curent pe care o poate suporta.

Dezavantajele acestei pile sunt: consumul mare de zinc în stare de repaus și degajarea de vapori nocivi.

O varietate a acestei pile este pila cu anod din plumb amalgamat, dar în acest caz forța electromotoare scade la 1,1...1,25 V.

Element cu bicromat de potasiu fără diafragmă (pila Grenet). Sistemul electrochimic folosește proprietatea oxidantă a ionilor $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$; el se compune din



Reacția de funcționare este:



Procesul la anod:



Procesul la catod:



adică:

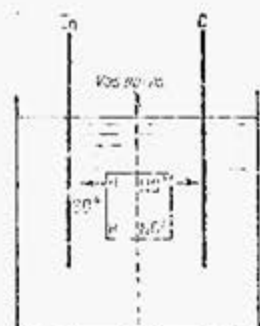


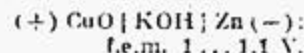
Fig. 11. — Pila cu acid azotic (schema de funcționare).

Potențialul de electrod este de oxidare-reducere, $V^0 = +1,2 \text{ V}$, pentru o concentrație de 1N CrO_3 , într-un litru de H_2SO_4 . Rezistența interioară este circa 0,3 Ω .

Construcția. Elementul se compune dintr-un vas de sticlă care are de obicei forma unei butelii (fig. 12). Capacul vasului poartă doi electrozi de cărbune (catod) și un electrod de zinc amalgamat (anod) montat între cele două plăci de cărbune. Soluția de electrolit este compusă dintr-un amestec: o parte $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, două părți H_2SO_4 și 12 părți apă.

Zincul fiind puternic atacat de electrolit, electrozii de zinc se scot din lichid în timpul repausului.

40. Elemente galvanice cu depolarizant solid.
a) **Pila cu oxid de cupru.** Sistemul electrochimic se compune din:



f.e.m. 1...1,1 V.

Reacția de funcționare este:



Procesul la catod:



Având în vedere slaba solubilitate a CuO , potențialul cuprului în cadrul acestei reacții este de $V \approx 0,11 \text{ V}$.

Procesul la anod:



Potențialul Zn se stabilește față de sarea complexă K_2ZnO_2 și este de circa $V_{\text{Zn}} = -1,26 \text{ V}$.

Construcția. Elementul cu oxid de cupru se compune dintr-un vas de sticlă cu un capac de ebonită, în care sînt fixați doi electrozi (anozi) exteriori din tablă de zinc amalgamat și un electrod (catod) central dintr-o placă de cupru, purtînd o masă activă de oxid de cupru. Placa se confecționează prin presarea pe un grătar de cupru, a unei paste compuse din 16 părți oxid negru de cupru, o parte clorură de magneziu și o parte oxid de magneziu, amestecate cu apă distilată.

Sub electrozi este lăsat un spațiu pentru colectarea sării complexe K_2ZnO_2 , formată în timpul reacției și care, fiind mai densă decît electrolitul, se lasă la fund.

În unele construcții (compacte) vasul este din fier. În creștăturile de pe fața interioară a vasului se depune pe cale electrolitică oxidul de cupru. Electrodul de zinc este așezat în centrul vasului (fig. 13). Oxidul de cupru transformat în cupru metalic, se regenerează prin introducerea vasului în cuptor la 150–200°C.

Avantaje: o mare capacitate specifică de masă și de volum, un coeficient de utilizare a maselor active foarte înalt, 75% CuO , 95% Zn și 70% KOH . Construcțiile moderne folosesc vase metalice etanșe din tablă și electrozi pastați, sau vase de fontă cu acoperire



Fig. 12. — Pila cu bicromat de potasiu.

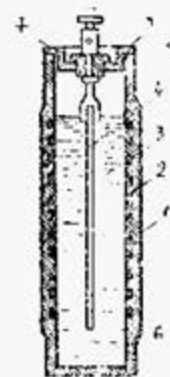


Fig. 13. — Pila cu oxid de cupru:

1 — vas exterior; 2 — oxid de cupru introdus în creștătură; 3 — electrolit alcalin; 4 — electrodul de zinc; 5 — capac ermetic; 6 — spațiu pentru electrolit consumat.

galvanică interioară de cupru, pe care se aplică masa activă din oxid de cupru, vasul servind și ca electrod pozitiv.

Se poate folosi ca electrolit soda caustică. Rezistența interioară este mică, de ordinul 0,03–0,05 Ω ; ea se micșorează pe măsura transformării oxidului de cupru în cupru metalic.

Tensiunea scade la începutul funcționării de la 1 V la 0,9...0,8 V, rămânând apoi constantă (fig. 14).

Elementul permite debitarea unor intensități de curent relativ mari, fără efecte de polarizare. Curentul de scurtcircuit al pilei de dimensiuni curente poate atinge 2,5–5 A. Autodescărcarea este neînsemnată, deoarece solubilitatea oxidului de cupru în sodă sau în potasă caustică este mică, iar depunerea cuprului la anod nu este posibilă.

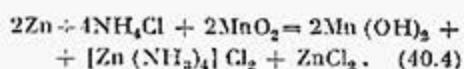
Dezavantaj: tensiunea de lucru mică.

β) Elemente cu depolarizant bioxid de mangan (D. M) – (Leclanché). Sistemul electrochimic se compune din:

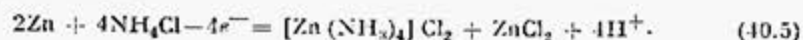


f.e.m. 1,4...1,65 V.

Reacția de funcționare (după S. S. Markov și A. P. Okatov):



Reacția la anod:



Potențialul electrodului negativ se determină conform ecuației:

$$V_{\text{Zn}} = V^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{[\text{H}^+]^4 [\text{ZnCl}_2]}{[\text{NH}_4\text{Cl}]^4}. \quad (40.6)$$

Reacția la catod:



Mărimea potențialului electrodului pozitiv se determină conform ecuației:

$$V_{(+)} = V^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{[\text{MnO}_2]^2 [\text{H}_2\text{O}]^4}{[\text{Mn}(\text{OH})_2]^2 [\text{OH}^-]^4}; \quad (40.8)$$

$$V_{(+)} = V^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{K}{[\text{OH}^-]^4}; \quad (40.9)$$

$$V_{(+)} = V^0 - \frac{RT}{F} \ln [\text{OH}^-] = V^0 - 0,058 \text{ pH}^1). \quad (40.10)$$

¹⁾ La 20°C (293°K).

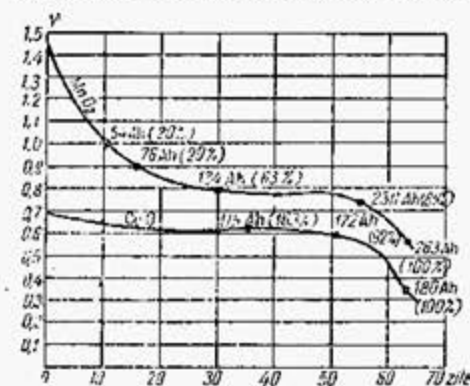


Fig. 11. — Comparatie între curbele de descărcare a elementelor MnO_2 și CuO .

Ecuațiile potențialelor celor doi electrozi arată că:

— mărimea potențialului electrodului pozitiv se găsește în dependență funcțională de concentrația hidroxidului și anume cu cât pH-ul soluției este mai mic, cu atât mai mare este potențialul de electrod;

— pe măsura creșterii concentrației ionilor de hidrogen și a micșorării concentrației clorurii de amoniu, potențialul negativ al electrodului de zinc devine mai pozitiv, astfel încât micșorarea pH-ului coboară potențialul electrodului de zinc.

Construcția acestui element este descrisă în paragraful elemente galvanice industriale.

În fig. 14 sînt date, pentru comparație, curbele caracteristice ale celor două elemente cu depolarizant solid, descrise mai sus.

41. Elemente galvanice cu depolarizant gazos. α) Elemente cu depolarizant aer. Acestea au la bază două sisteme electrochimice:

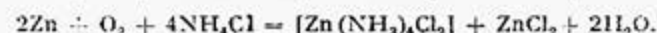


și:



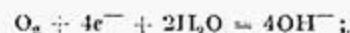
Elementele aparținînd primului sistem se fabrică numai uscate. Cele din sistemul al doilea dimpotrivă, numai umede, cu soluții apoase.

β) Elemente cu depolarizant aer și clorură de amoniu (D. O.). F.e.m. = 1,5 V. Reacția de funcționare:



Procesul la anod (vezi elementul cu depolarizant MnO_2).

Procesul la catod:



$$V_{(+)} = V^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{1}{[\text{OH}^-]^4};$$

$$V_{(+)} = V^0 - \frac{RT}{F} \ln [\text{OH}^-].$$

Construcția. Electroful pozitiv (păpușă) se compune dintr-un creion de cărbune, în jurul căruia este presată masa depolarizantă compusă din grafit și cărbune activ, aglomerată cu soluție apoasă de clorură de amoniu și de zinc (fig. 15). Păpușă este învelită în plinză de bumbac. Electroful negativ de zinc formează și cutia elementului. Spațiul dintre zinc și păpușă este umplut cu electrolit pastă. Spațiul de deasupra păpușii este legat cu exteriorul prin două tubușoare de sticlă, pentru contactul cu aerul. Varianta acestei construcții este elementul Akimushkin, care suprimă tubușoarele de acces al aerului, întrebunînd un tub de cărbune gol avînd deschizături radiale (elemente V.D.A. — U.R.S.S.).

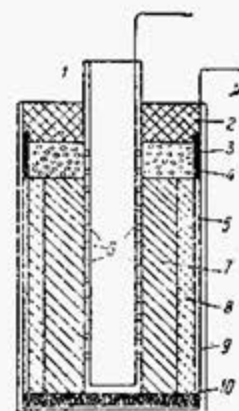
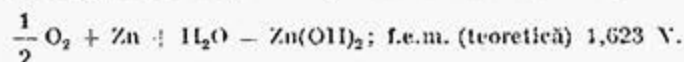


Fig. 15. — Pila cu depolarizant aer și electrolit imobilizat (uscat):

1 — cilindru de cărbune; 2 — mastic de bitum; 3 — rumeș de lemn; 4 — cilindru izolant de carton; 5 — electrod de zinc (pahar); 6 — orificii pentru accesul aerului; 7 — masă de cărbune activ; 8 — electrolit imobilizat; 9 — ambalaj de carton; 10 — runda izolantă.

γ) Elemente cu depolarizant aer și electrolit alcalin. Reacția de funcționare:



Película de hidrat de zinc reacționează cu hidroxidul de potasiu, dând o sare complexă solubilă în apă:



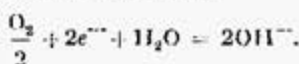
Procesul la anod:



$$V_{\text{anod}} = V_{\text{Zn}} = \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{[\text{OH}^-]^2} = -1,216 - 0,058 \lg 2 = -1,23 \text{ V.}$$

V'_{Zn} corespunde unei valori calculate pentru cazul unei concentrații foarte mici a zincului din cauza solubilității foarte mici a Zn(OH)_2 în apă. Concentrația Zn(OH)_2 este considerată egală cu 1.

Procesul la catod:



Concentrația ionică $[\text{OH}^-]$ se consideră = 2.

Valoarea potențialului normal de oxigen la pH = 14:

$$V_{\text{O}_2}^0 = +0,41 \text{ V.}$$

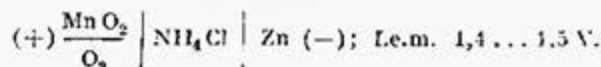
$$V_{(+)} = +0,41 - 0,058 \lg 2 = +0,393 \text{ V.}$$

Construcția elementului (după Spiridonov). Pe un capac de ebonită sunt fixați doi electrozi de zinc și între ei, un electrod pozitiv în formă de sac din sită de fier, umplut sub presiune cu o masă poroasă de cărbune activ, prezentând, în interiorul lui, canale pentru accesul aerului (fig. 16). Electrozi sunt cufundați într-un vas de sticlă conținând o soluție de potasă caustică de greutatea specifică 1,38 g/cm³.

Fig. 16. — Pila cu depolarizant aer și electrolit alcalin (lichid):

1 — electrozi din cărbune presat; 2 — orificii în capac; 3 — electrod de zinc, turnat în formă de opt; 4 — vas exterior.

12. Elemente galvanice cu depolarizare mixtă (solidă și gazoasă) (D.M.O.) Se întrebuintează depolarizarea cu bioxid de mangan și aer. La baza acestor elemente stă următorul sistem electrochimic:



Construcția acestor elemente este asemănătoare cu a celor cu depolarizant aer $\text{O}_2 \mid \text{NH}_4\text{Cl} \mid \text{Zn}$ și cuprinde de obicei electrolit imobilizat (fig. 17).

Masa depolarizantă se compune din 35% MnO_2 , 20% cărbune activ și 45% grafit.

Acest tip de element permite intensități de descărcare mai mici decât cel cu depolarizant solid sau aer (de două, trei ori), însă are o capacitate mare la descărcare cu curenți slabi.

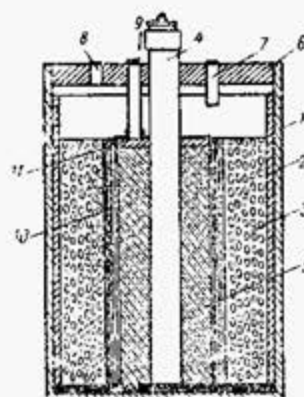


Fig. 17. — Pila cu depolarizant mixt:

1 — înveliș exterior de carton; 2 — electrod de zinc în formă de pahar; 3 — electrolit imobilizat; 4 — electrod de cărbune; 5 — masă depolarizantă din MnO_2 și cărbune activ; 6 — masă de bitum; 7, 8 — tuburi pentru ieșirea gazelor; 9 — tub de acces pentru aer la masa depolarizantă; 10 — hirtie absorbantă imbibată cu electrolit; 11 — strat de material poros.



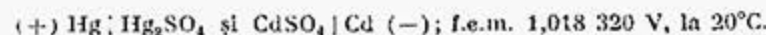
Fig. 18. — Elementul etalon cu cadmiu.

13. Elemente etalon (normale). Elementul etalon trebuie să corespundă următoarelor condiții:

- să fie ușor de produs, adică să aibă aceeași f.e.m. când se montează în diferite țări cu produse chimice de origini diferite;
- f.e.m. să nu varieze cu timpul;
- variația f.e.m. în funcție de temperatură să fie cunoscută și cât mai mică;
- elementul să nu prezinte o polarizare sensibilă;

... elementul să fie transportabil (pe cât posibil).

Elementul cu cadmiu. Sistemul electrochimic este constituit din:



El se compune dintr-un vas de sticlă, de dimensiuni mici, în formă de II (fig. 18). Electrocul pozitiv este format din mercur turnat pe fundul brațului stâng; electrocul negativ din amalgam de cadmiu (12,5% Cd), se găsește în brațul drept al vasului. Mercurul este acoperit cu pastă depolarizantă compusă din sulfat de mercur solid, cristale de sulfat de cadmiu ($\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$) și mercur. Spațiului de deasupra amalgamului de cadmiu se umple cu cristale mici de sulfat de cadmiu ($\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$). Electrolitul este soluția saturată de sulfat de cadmiu (și sulfat de mercur). Cei doi electrozi sunt menținuți în loc de strangulările tuburilor brațelor. Vasu este închis etanș.

Rezistența interioară a elementului este cuprinsă între 500 și 1 000 Ω .
Puritatea foarte mare a tuturor substanțelor componente formează o condiție esențială a bunei funcționări a elementelor etalon.

Coefficientul de temperatură este de circa $4 \cdot 10^{-5} ^\circ\text{C}$

$$(E_t = E_{20} - 4 \cdot 10^{-5} (t - 20) [\text{V}],$$

ceea ce îl face practic neglijabil.

Calculul precis al f.e.m. la diferite temperaturi se face cu formula:

$$E_t = E_{20} - 406 \cdot 10^{-7} (t - 20) - 9,5 \cdot 10^{-7} (t - 20)^2 + 10^{-8} (t - 20)^3 [\text{V}].$$

Valoarea constantă a f.e.m. se stabilește câteva luni după fabricare. F.e.m. rămâne apoi constantă mulți ani, cu condiția ca elementul să fie ferit de lumină.

Elementele normale se fabrică în două sisteme:

- cu electrolit format din soluție de sulfat de cadmiu saturată la temperatura de întrebuințare a elementului (elementul normal internațional);
- cu electrolit format din soluție de sulfat de cadmiu nesaturată la temperaturi peste $+4^\circ\text{C}$ (elemente normale nesaturate).

Normele GOST 1954-43 împart elementele normale în trei clase, după gradul de precizie în determinarea f.e.m. și după stabilitatea acesteia (tabela 10).

Tabela 10

Clasa	Valoarea f.e.m., în V abs.		Erori admisibile în determinarea f.e.m. $\mu\text{V abs.}$	Variația admisibilă a f.e.m. în timp de un an $\mu\text{V abs.}$
	De la	Până la		
I	1,018 55	1,018 75	10	50
II	1,018 5	1,018 7	100	100
III	1,018 7	1,019 6	100	300

Elementele cu soluția de electrolit nesaturată se execută numai de clasa a III-a, iar cele cu soluția de electrolit saturată de clasa I-a și a II-a.

Sînt obligatorii următoarele reguli de folosire a elementelor normale: 1) nu trebuie scuturate sau agitate; 2) nu trebuie să debiteze sau să fie traversate de intensități de curent mai mari de 0,000 001 A; 3) trebuie ferite de lumina solară; 4) trebuie păstrate la o temperatură cât mai constantă.

44. Elemente galvanice industriale de serii mari. Elementele galvanice industriale sînt bazate pe următoarele sisteme electrochimice (v. § 41): cu depolarizant bioxid de mangan (D.M.), cu depolarizare prin oxigen din aer (D.O.), și cu depolarizare combinată din cele două sisteme (D.M.O.)¹⁾.

Aceste elemente au întrebuințări foarte numeroase, astfel că fabricarea lor se face adeseori pe mașini automate, atingînd producții de zeci de mii de piese sau ansambluri în opt ore.

După principalele domenii de întrebuințare, aceste elemente se împart în:

- elemente pentru baterii de buzunar;
- elemente pentru baterii anodice (normale și pastilă);
- elemente pentru baterii de semnalizare și telecomunicații.

¹⁾ Notările „D.M.”, „D.O.” și „D.M.O.” nu sînt standardizate și sînt explicate în § 45 și 46.

După construcția lor, ele se împart în următoarele tipuri:

45. Elemente umede (elemente sac). Sistemul poate fi notat prescurtat prin D.M.L (depolarizare bioxid de mangan și electrolit lichid). El se compune dintr-un vas de sticlă și un electrod pozitiv format dintr-o masă de piroluzită și grafit, presată în jurul unui creion de cărbune; electrodul negativ este de zinc, de forma unui cilindru gol, nelacheiat; electrolitul este o soluție de 20% clorură de amoniu; electrodul pozitiv, masa depolarizantă și cărbunele sînt îmbrăcați în pinză (sac) și legați cu o sfoară, care poartă perle de sticlă sau porțelan pentru a menține distanța dintre cei doi electrozi.

Electrodul de zinc trebuie să fie așezat sub nivelul soluției, pentru a nu da naștere la fenomene secundare de oxidare a zincului de către oxigenul din aer.

După un anumit timp de funcționare se depune pe electrozi sarea insolubilă $[\text{Zn}(\text{NH}_4)_2\text{Cl}_2]$, mărind considerabil rezistența interioară a elementului. Acesta va trebui deci să fie curățat și spălat din timp în timp. Caracteristicile principale ale elementului de dimensiunile arătate mai jos sînt: f.e.m. 1,45 — 1,5 V, rezistența interioară la începutul descărcării 0,2 — 0,5 Ω și circa 1 Ω la sfîrșitul descărcării. Tensiunea finală s-a convenit să fie 0,7 V (circuit telefonice). Capacitatea elementului, cu dimensiunile exterioare: $H = 200 \text{ mm}$; $\varnothing = 100 \text{ mm}$, pentru $U_f = 0,7 \text{ V}$ și $R_{ext} = 10 \Omega$, este de 60 — 80 Ah.

a) Elementele cu umplere cu electrolit (activare) la punerea în funcțiune pot fi notate cu D.M.A.F. [depolarizare (D), bioxid de mangan (M) și punere în funcțiune (activare), (A), facultativă (F)].

Această execuție se face în scopul unei păstrări îndelungate a elementului, fără ca să scadă capacitatea acestuia.

Construcția. Elementul cuprinde o cutie exterioară de zinc, care servește și ca electrod negativ; electrodul pozitiv este asemănător cu cel al elementului sac, învelișul de pinză fiind înlocuit sau dublat cu o izolație potrivită (fig. 19). În partea superioară a elementului, sub capac, este un spațiu umplut cu rumeguș de lemn, care comunică cu exteriorul printr-un tub de umplere. Prin acest tub elementul se umple cu o soluție de 20% clorură de amoniu la punerea lui în funcțiune.

Elementul este gata de funcționare numai după câteva ore de la activare (6 ore). Păstrarea în depozit se face cu orificiile de umplere și de aerisire astupate.

β) Elementele cu activarea prin apă (D.M.A.A.). Acestea sînt o variantă a elementului cu umplere facultativă D.M.A.F., activarea făcîndu-se prin turnarea apei în element, care conține în spațiul superior și în masa depolarizantă cristale de clorură de amoniu.

Elementele cu electrolit lichid și cu activare facultativă au avantajul că se pot umple cu electrolit special în cazul funcționării la temperaturi joase și foarte joase. Acești electroliti sînt compuși în principiu din clorură de calciu de o greutate specifică 1,28 sau din potasă caustică de aceeași densitate. Acești electroliti se înlocuiesc din nou cu un electrolit normal, îndată ce condițiile normale de temperatură au revenit.

46. Elemente uscate. Sistemul poate fi notat cu D.M.U. [depolarizarea cu bioxid de mangan electrolit uscat (imobilizat)], sau D.O.U. (depolarizant

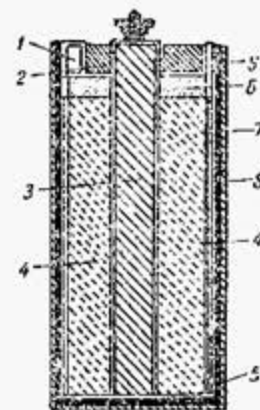


Fig. 19. — Elementul D.M. cu umplere facultativă: 1 — orificiu pentru umplere cu electrolit; 2 — masă de bitum; 3 — electrod de cărbune; 4 — masă depolarizantă; 5 — electrod de zinc; 6 — rumeguș de lemn; 7 — ambalaj exterior.

oxigen cu electrolit uscat). Electrolitul, sub formă de pastă, se introduce în element la asamblarea acestuia în uzină.

Electrodul pozitiv se compune dintr-un creion de cărbune cu o secțiune rotundă sau dreptunghiulară; în jurul acestuia este presată masa depolarizantă în formă de cilindru (fig. 20) sau paralelipiped dreptunghiular (fig. 21). Această masă

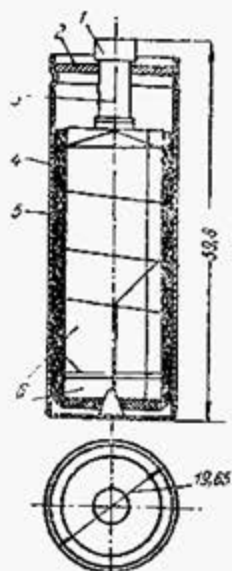


Fig. 20. — Elementul uscat cu depolarizant bioxid de mangan:

1 — bornă de alamă; 2 — rondelă-capac; 3 — electrod de cărbune; 4 — electrolit imobilizat; 5 — electrod de zinc; 6 — masă depolarizantă.

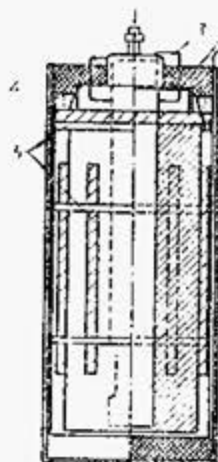


Fig. 21. — Elementul uscat în formă paralelipedică cu depolarizant bioxid de mangan (și mixt):

1 — masă depolarizantă; 2 — mastic de bitum; 3 — electrod de cărbune; 4 — electrod de zinc; 5 — izolatoare; 6 — spațiul electrolitului imobilizat.

se învelește în plină și se leagă cu apă, formând așa numita «păpușă» a elementului. Dimensiunile «păpușii» variază după capacitate; raportul dintre diametrul cilindricului de cărbune și diametrul «păpușii» este de 1:3 sau 1:4, iar cel dintre înălțimea și diametrul «păpușii» este de minimum 1:2.

Masa depolarizantă conține, în afară de bioxid de mangan, grafit, negru de fum și alte substanțe. Bioxidul de mangan se întrebuințează sub formă naturală de piroluzită purificată, amestecată cu piroluzită artificială (electrolitică) sau (și) activată (de exemplu piroluzită GAL — U.R.S.S.). Raportul dintre cantitatea de piroluzită și grafit este determinat de destinația și de regimul de descărcare pe care

le va avea elementul. Același lucru este valabil și în privința adăugării la masa activă a piroluzitelor activate și artificiale, cum și a negruului de fum (care este în genere de acetilenă). Întrebuințarea materialelor activate și artificiale în compoziția masei active a permis creșterea considerabilă a capacității specifice la diferite regimuri de descărcare a elementului uscat, cum și micșorarea efectului dăunător al autodescărării.

Electrodul, negativ, care formează și cutia exterioară a elementului, este din zinc electrolitic foarte pur (99,90—99,94 %) ¹⁾ (v. § 48).

Electrolitul imobilizat este produs prin încălzirea unui electrolit lichid turnat în element, sau prin adăugirea la electrolit a unor substanțe gelatinoase, astfel încât în scurt timp de la turnare, el trece sub formă de pastă.

Exemple de pastă:

Gelatinizarea prin încălzire:

H_2O	NH_4Cl	$ZnCl_2$	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$
1000 g	250 g	75 g	75 g

Se adaugă la 1 litru soluție 2 g $HgCl_2$ și 250 g făină de grâu.

Gelatinizarea la rece:

$NHCl$ 20 %	$ZnCl_2$ 40 %	amidon de porumb	făină de grâu
84 părți în greutate	16 părți în greutate	50 părți în greutate	5 părți în greutate

Se adaugă înainte de umplerea elementelor un volum egal de $ZnCl_2$ 40% și 0,1 % față de rețeta de bază de $Na_2Cr_2O_7$ (în loc de $HgCl_2$) ²⁾.

În fig. 22 este arătată schema procesului tehnologic de fabricație a elementelor D.M.U.

47. Caracteristicile electrice ale elementelor D.M., D.O. și D.M.O. x) *Forța electromotoare.* Mărimea practică a f.e.m. a acestor elemente este de circa 1,5 V. La elemente D.M., ea variază cu activitatea bioxidului de mangan folosit; mărimea potențialului normal al electrodului pozitiv la diferite sorturi de bioxid de mangan este arătată în tabela 11.

Variația mărimii potențialelor electrozilor pozitiv și negativ în funcție de compoziția masei depolarizante și a electrolitului se poate calcula pe baza formulelor (40.6) și (40.10):

$$V_{(+)} = V^0 - \frac{RT}{F} \ln [OH^-];$$

$$V_{(-)} = V_{Zn}^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{[ZnCl_2] [H^+]^4}{[NH_4Cl]^4}.$$

Valorile V^0 sînt date în tabela 11.

Calculul f.e.m. a elementelor cu depolarizarea mixtă — bioxid de mangan și aer (D.M.O.) — este complicat din cauza dublului proces la electrodul pozitiv la care are loc simultan reducerea bioxidului de mangan și formarea ionilor hidroxil.

F.e.m. a elementelor cu depolarizante MnO_2 nu variază simțitor cînd se adaugă la masa depolarizantă grafit și negru de fum de acetilenă, afară de cazul cînd electrolitul este hidroxid de potasiu sau de sodiu (tabela 11).

¹⁾ Conținutul de impurități nu trebuie să depășească 0,06 % din care: fier < 0,015 %; plumb < 0,024 %, cadmiu < 0,014 %, cupru < 0,002 %; în proporții și mai mici trebuie să fie staniu, nichel și cobalt. Arsenul și antimonul vor lipsi cu totul.

²⁾ Pentru funcționarea la temperaturi joase, elementele uscate D.M.U., D.O.U. și D.M.O.U. fabricate în U.R.S.S. (M.D., V.D., M.V.D.) conțin paste speciale după rețeta Morozov și Krivolufkaia.

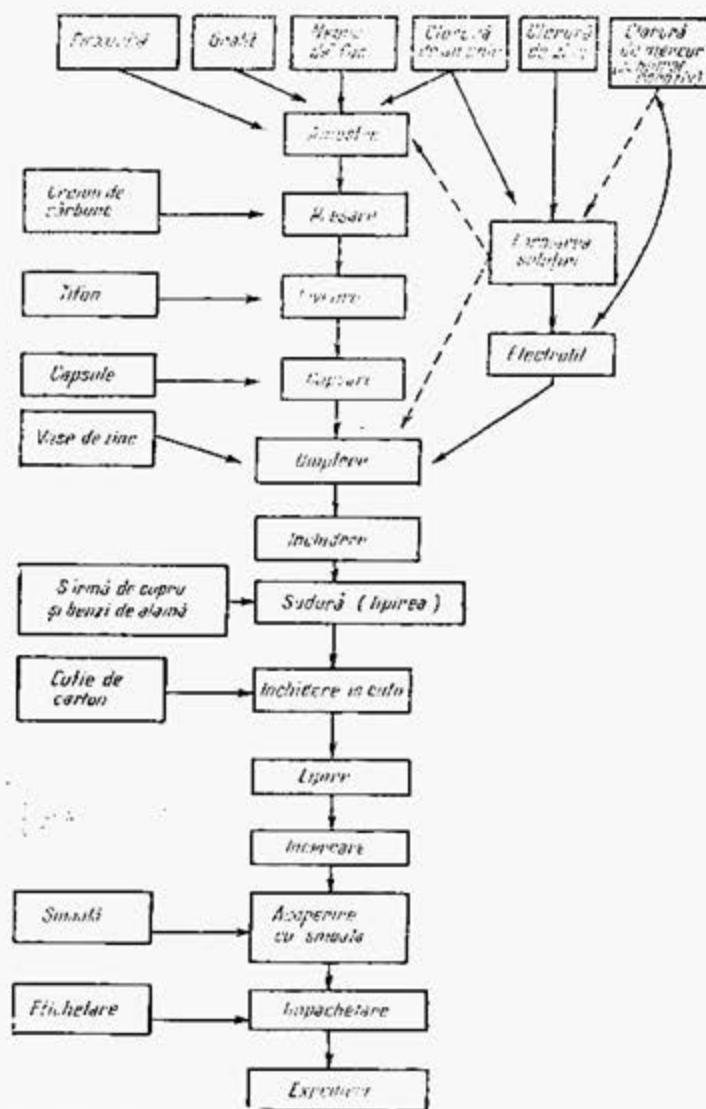


Fig. 22. — Schema de fabricație a elementelor galvanice uscate.

Tabela 11. Variația potențialului electrodului pozitiv în funcție de compoziția masei depolarizante și a electrolitului

Folul biosidului de mangan întrebunțat	Potențialul electrodului pozitiv față de electrodul de hidrogen									
	In soluție de 4N NH_4Cl			In soluție de 4N H_2SO_4			In soluție de 4N CaCl_2			Sol. 4N MnCl_2
	Material curat	Amestec 80:20	Amestec 80:17:3	Material curat	Amestec 80:20	Amestec 80:17:3	Material curat	Amestec 80:20	Amestec 80:17:3	
Natural (din regiunea Clu- tura-Cănești)	0,780	0,763	0,754	1,352	1,319	1,343	0,868	0,834	0,815	0,817
Natural	0,882	0,863	0,863	1,379	1,371	1,373	0,894	0,886	0,886	0,899
Artificial (electrolitic)	1,029	0,999	0,997	1,343	1,337	1,337	1,010	1,040	1,012	0,975
Activat (GAP) in- dustrial	1,026	1,018	1,011	1,326	1,318	1,323	1,085	1,078	1,071	1,087
pH-ul soluției	4,93			5,50			5,50			5,39

Observație: Amestec 80:20 înseamnă 80% MnO_2 + 20% grafite;
Amestec 80:17:3 înseamnă 80% MnO_2 + 17% grafite + filburgin (negru de fum de acetilură).

3) *Tensiunea la borne.* Conform normelor de utilizare, caracteristicile $U = f(t)$ ale elementelor cu depolarizare bioxid de mangan, aer și mixtă se stabilesc la următoarele regimuri de descărcare (v. § 21):

a) elementele de telecomunicații: descărcarea pe o rezistență exterioră de $R = 10 \Omega$, tensiunea finală fiind $U_f = 0,7V$;

b) elementele pentru baterii anodice; rezistența de descărcare este de $R = 113 \Omega$, iar tensiunea finală $U_f = 1 V$;

c) elemente pentru baterii de buzunar $R = 3,33 \Omega$, $U_f = 0,67 V$.

Tensiunea inițială a acestor elemente este în genere cu 6–8 % mai mică decât f.e.m. inițială. Căderea de tensiune la bornele elementelor în timpul descărcării

este produsă de fenomenele de polarizare și de rezistența interioară. Polarizarea este datorată mai ales fenomenelor de variație a concentrației ionilor la cei doi electrozi, ceea ce se constată prin revenirea tensiunii pilei la valori inițiale după un timp de repaus. Caracterul descrescător al curbei de descărcare $U = f(t)$ se datorează variației neliniare a factorilor de care depinde tensiunea ($U = E - E_p - Ir_a$) (v. fig. 14). V. S.



Fig. 23. — Regimul de funcționare intermitentă a elementului D.M.N.

Lizlov, G. G. Morozov și A. G. Elsnitz au arătat caracterul parabolic al acestei variații, exprimat prin formula:

$$U = U_i - b \sqrt{t}$$

în care: U_i este tensiunea inițială;

t — timpul de la începutul descărcării;

b — constantă.

Valoarea tensiunii medii este dată de formula (Lizlov):

$$U_m = \frac{U_i + 2U_f}{3}$$

indicii i și f reprezintă tensiunea inițială și finală.

Stabilirea caracteristicii $U = f(t)$ se poate face în două feluri: prin descărcare continuă sau prin descărcare intermitentă (cu întreruperi). Întrebuintarea uneia sau a celeilalte metode depinde de condițiile de folosire a elementului. S-a constatat o diferență între capacitatea pilei determinată prin cele două metode.

Metoda a doua este foarte des folosită, deoarece cuprinde doi factori esențiali: repausul elementului și autodescărcarea.

Curba de descărcare în regim intermitent se compune din porțiuni de curbe periodice, fiecare porțiune caracterizând variația tensiunii în intervalul de timp în care a funcționat elementul. Fig. 23 arată funcționarea timp de 6 ore, întreruptă prin intervale de 18 ore, regimul folosit des pentru ridicarea caracteristicilor $U = f(t)$ la descărcări intermitente.

γ) *Rezistența interioară.* Rezistența interioară a elementelor D.M., D.O. și D.M.O. crește încet la începutul descărcării. În unele

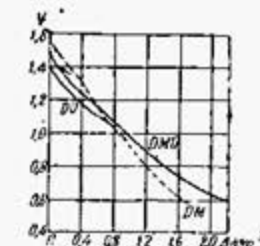


Fig. 24. — Comparatie între curbele de descărcare a elementelor D.M., D.O. și D.M.O.

cazuri, ea descresce. Această primă fază este scurtă, apoi creșterea rezistenței interioare totale (măsurată în curent continuu, v. § 27) devine rapidă, atingând o valoare care depășește pe cea inițială de câteva ori. Rezistența interioară totală depinde de factorii care influențează fenomenele de polarizare (densitatea curentului de descărcare, temperatura, etc.) sau care modifică rezistența ohmică normală (dimensiunea electrozilor etc.).

Valorile medii după dimensiunile și tipul elementului sînt date în tabela 12.

Tabela 12

Elemente	Sistemul de depolarizare			
	Cu bioxid de mangan			Cu aer și mixt
	mici	mijlocii	mari	
Rezistența interioară la începutul descărcării, în Ω	0,3–0,6	0,25–0,5	0,1–0,2	0,03–0,05

Rezistența interioară totală se calculează cu formula:

$$r_a = \frac{E - U}{I}$$

pe baza caracteristicii tensiune-curent. În loc de intensități de curent, se lucrează uneori cu densități de curent, exprimate în amperi pe decimetru pătrat de suprafață laterală a elementului, care caracterizează (cu oarecare aproximație) suprafața utilă (de lucru) a electrozilor elementului uscat:

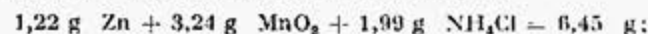
$$r_a = \frac{E - U}{J \cdot s}$$

în care: J este densitatea de curent;

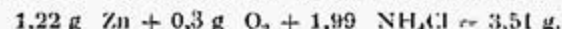
s — suprafața laterală a elementului.

8) *Capacitatea elementelor cu depolarizant bioxid de mangan, aer și mixt.* Capacitatea elementelor este caracterizată prin cantitățile de masă activă care pot reacționa între ele în timpul descărcării elementului, pînă la o tensiune finală stabilită. Consumul teoretic (în g) al maselor active pentru 1 Ah, conform legii lui Faraday, este următorul: zinc 1,22; bioxid de mangan 3,24; oxigen 0,30; clorură de amoniu 1,99; potasă caustică 1,04, de unde rezultă următoarele consumuri teoretice ale maselor active pe 1 Ah:

— elemente cu depolarizant bioxid de mangan:



— elemente cu depolarizant aer și electrolit clorură de amoniu:



Coefficientul de utilizare a bioxidului de mangan și a zincului este totdeauna mai mic decât unitatea. Acest coeficient este cu atât mai mic, cu cît dimensiunile bateriei sînt mai mici. Astfel, în elementele uscate coeficientul de utilizare a bioxidului de mangan variază între 0,1 și 0,4, iar a zincului între 0,08 și 0,5. În elementele cu electrolit lichid, coeficientul de utilizare a zincului este considerabil mai mare. Consumul clorurii de amoniu întrece și el pe cel teoretic, deoarece, în afară de reacțiile de bază, au loc în elemente și reacțiile secundare. Acest coeficient coboară uneori pînă la 0,5.

ε) *Capacitatea specifică.* Capacitatea specifică a elementelor pentru baterii de buzunar și telecomunicații cu depolarizant bioxid de mangan și mixt este de 20–35 Ah/kg și 30–70 Ah/dm³ la cele cu MnO₂ (D.M.) și de 85 Ah/kg și 150 Ah/dm³ la cele mixte (D.M.O.).

Ea este mult mai mică la bateriile anodice și de tip pastilă, fiind de 0,3–0,9 Ah/kg și 0,45–1,3 Ah/dm³.

Valorile arătate sînt valabile pentru densitățile de curent nominale ale fiecărui tip de element.

La un regim de descărcare cu densități de curent relativ mici, elementele D.M.O. au o capacitate specifică de aproximativ trei ori mai mare decît elementele D.M. La densități de curent mai mari situația se inversează, ea devenind de circa 1,5 ori mai mare la elementele D.M. (fig. 24).

Pentru elementul cu depolarizant mixt (și în parte și pentru celelalte elemente din sistemul Leclanché), G. G. Morozov a stabilit următoarea formulă experimentală a variației capacității specifice în funcție de volumul masei depolarizante și de densitatea de curent (variația hiperbolică):

$$\frac{C_{Ah}}{V} \left(\frac{J}{s} \right)^P = \text{const.},$$

în care: V este volumul masei depolarizante;

J — densitatea de curent;

s — suprafața medie a masei depolarizante;

P — constantă.

Din această formulă reiese că unei descreșteri continue a densității de curent îi corespunde o creștere infinită a capacității. De fapt însă există o densitate de curent minimă, sub care capacitatea nu mai crește. La elementele cu depolarizare mixtă, ea corespunde unei valori de 0,5 mA/cm².

V. S. Lizlov a stabilit o formulă experimentală pentru calculul (cu o exactitate practică) capacității elementului în funcție de tensiunea medie de descărcare, durata descărcării și rezistența exterioară:

$$C_{Ah} = \frac{U_i + 2U_f}{3} \frac{t}{R} = U_m \frac{t}{R} = \alpha \cdot t,$$

în care: $\alpha = \frac{U_m}{R} = \text{const.}$, în cazul cînd se consideră $U_m = \text{const.}$

ζ) *Variația capacității cu intensitatea curentului de descărcare.* Capacitatea elementului scade cu creșterea curentului de descărcare, deoarece tensiunea finală (v. § 47 β) este atinsă cu atît mai repede cu cît intensitatea curentului de descărcare este mai mare; aceasta se datorește polarizării de concentrație, produsă de sărăcirea soluției în ioni în apropierea electrozilor, care crește cu mărirea densității de curent deoarece egalizarea concentrației prin difuzie este mai încheată decît viteza de descărcare a ionilor.

Fiecare construcție și tip de element au deci un regim maxim de descărcare, care corespunde capacității nominale indicate de uzina constructoare.

η) *Variația capacității cu temperatura.* Capacitatea variază și în funcție de temperatură și anume crescînd pînă la o anumită limită pe măsura creșterii temperaturii.

Această limită de creștere a capacității elementului este condiționată de predominarea factorilor pozitivi ca: micșorarea viscozității, mărirea difuziei etc., față de factorii negativi ca: activarea autodescărării etc. Astfel, la atingerea unei

anumite temperaturi, capacitatea încetează de a mai crește; peste această temperatură capacitatea începe să descrească, ajungînd la o altă limită cînd devine aproape nulă (+60 °C).

Micșorarea capacității cu coborîrea temperaturii se explică prin mărirea viscozității ceea ce mărește rezistența interioară a soluției electrolitului și prin micșorarea difuziei.

θ) *Variația capacității cu regimul de descărcare* (continuu și discontinuu). S-a putut stabili o regulă: la intensități mici ale curentului de descărcare, capacitatea elementului este mai mare la un regim de descărcare continuu decît la cel cu întreruperi; la intensități mari ale curentului de descărcare, fenomenul se inversează. În primul caz, factorul principal este autodescărarea elementului; în al doilea caz, repausul, care permite revenirea elementului de la o descărcare la alta. În cazul descărcărilor intermitente, V.S. Daniel-Beck a dat următoarea formulă a capacității (la elementele D.O. și D.M.O.)

$$C_{dis} = \frac{qC_{Ah}}{q - \beta C_{Ah}},$$

în care: C_{dis} este capacitatea la regim de descărcare intermitentă;

C — capacitatea la regim de descărcare continuă cu o intensitate de curent normală;

q — regimul de descărcare în amper-ore pe zi;

β — coeficientul de autodescărare, adică partea din capacitatea totală a elementului pe care o pierde prin autodescărare pe zi și care, pentru elementele mari Leclanché, variază între 0,001 și 0,0014.

Această formulă dă însă valori ale capacității în regim intermitent, totdeauna mai mici decît cele în regim continuu.

Autodescărarea elementelor de tip Leclanché. Se deosebesc două cauze de autodescărare:

— cauze interne, care sînt procesele care au loc între materiile active, atît în timpul funcționării cît și al repausului elementului;

— cauze externe, provenite din proasta izolare a conductorilor, a cutiei etc. și care se manifestă prin circuite (parazitare) de scurgere a curentului.

Autodescărarea internă se datorește mai ales proceselor locale la electrodul negativ și în special reacției zincului cu clorura de amoniu, însoțită de eliberarea hidrogenului. Acest proces este intens cînd zincul nu este pur și mai ales cînd conține fier sau carbon, sau în general alte impurități mai electropozitive; în aceste procese de corozie zincul este anod, iar impuritatea pe care se degajă hidrogenul, catod.

În cazul contactului electrodului de zinc cu oxigenul din aer și în prezența clorurii de amoniu se formează un hidrat de zinc care trece în soluție; acest proces decurge fără degajare de hidrogen.

Mijloacele de combatere a autodescărării interne sînt:

a) Zincul întrebuintat în industria elementelor galvanice trebuie să fie foarte pur, de ordinul 99,99 %. În acest caz, amalgamarea zincului sau adăusul de 1 % plumb, care se practică pentru a proteja zincul de acțiunile locale, nu mai sînt necesare (v. § 46).

b) În cazul cînd nu se poate dispune de un zinc de o puritate atît de mare, amalgamarea zincului este necesară; este de asemenea practică întrebuintarea aliajelor de zinc cu mici cantități de cadmiu (0,2 %) sau de plumb (1%).

Tipul elementului	Depolarizant (păpușă)	Creioane de cărbune		
	Diametrul exterior sau latura, mm	Înălțimea, mm	Greutatea, g	Diametrul sau latura, mm
A	19,6 ± 0,1	34,5 ± 0,5	10,0	0
B	31 ± 1	56 ± 1	14	8 ± 0
C	50 ± 1	90 ± 1	32	8 ± 0
D	50 ± 1	140 ± 1	163 ± 10%	10 ± 0
E	63 ± 1	140 ± 1	510 ± 10%	14 ± 0
Ea	70 ± 1	160 ± 1	435 ± 10%	14 ± 0
F	73 ± 1	160 ± 1	722 ± 10%	18 ± 0
G	108 ± 1	197 ± 1	380 ± 10%	10 ± 0
H	130 ± 1	197 ± 1	565 ± 10%	10 ± 0

c) Electrolitul trebuie să fie cât mai pur și mai ales să nu conțină metale electropozitive față de zinc. Când nu se introduce în electrolit $HgCl_2$, este utilă întrebuintarea unui adaus de acid eromic sau de bicromați.

d) Elementele cu depolarizant bioxid de mangan trebuie ferite de contactul cu oxigenul, prin închidere etanșă.

Combaterea autodescărării externe se face prin proiectarea îngrijită a construcției cutiei și a bornelor.

48. Extras din STAS 808-49 și 809-49. Conform acestora clasificarea și notarea bateriilor galvanice uscate cu depolarizant bioxid de mangan (D.M.U.) și mixt (D.M.O.U.) fabricate în R.P.R. este următoarea:

BUZ — baterie uscată pentru iluminat cu celulă (elementul) A;

BVA — baterie uscată anodică cu celulă (elementul) B și C;

EUT — element uscat pentru telecomunicație cu celula D, E, Ea, F¹⁾;

EUFR — element uscat pentru filament radio cu celulă G și H¹⁾.

Dimensiunile și proprietățile electrice sînt arătate în tabelele 13 și 14.

49. Metode de încercare¹⁾ (STAS 808-49 și 809-49. a) Elemente D.M. Controlul formei, al dimensiunilor, al greutateilor, al aspectului exterior și al bornelor se face vizual și cu instrumente de măsurat adecvate.

Controlul izolației împotriva umidității se face ținînd elementul 24 ore într-o atmosferă umedă (80% higrometrică), după care se așază pe o placă de cupru legată la borna negativă a unui milivoltmetru. Borna pozitivă a milivoltmetrului se leagă la borna pozitivă a elementului. Acul milivoltmetrului nu trebuie să indice nici o diferență de potențial.

Controlul tensiunii inițiale în circuit deschis se face legînd la bornele elementului un voltmetru cu o rezistență interioară de minimum 500 Ω/V .

Controlul tensiunii inițiale de debitare se realizează conectînd elementul la o rezis-

¹⁾ Conform STAS 808-55, în vigoare din 1956, în loc de notarea EUT sau EUFR urmată de indicarea tipului celulei D, F, EaF, G, H se notează respectiv cu PU16, PU35, PU30, PU50, PU300, PU500. De asemenea sînt modificate unele condiții de recepție.

tență de 5 Ω (tabela 13 și 14), citirea tensiunii făcîndu-se imediat după executarea conexiunii.

Controlul capacității. Bateriile pentru iluminat sînt supuse unui regim de descărcare continuă, prin rezistențe fixe, a căror valoare este indicată în tabela 14. Tensiunile se vor nota în primele 15 minute din 5 în 5 minute și apoi din 15 în 15 minute. Descărcarea se va face pînă la tensiunea indicată în tabela 14. Cu valorile tensiunilor notate, luate ca ordonată și cu timpii de descărcare, luați ca abscisă, se va trasa o curbă. Prin planimetrare se va deduce capacitatea bateriei în amperore.

Tabela 14. Caracteristicile electrice ale elementelor cu bioxid de mangan (STAS 808 și 809-49)

Tipul elementului	Tipul bateriei la care se utilizează	Tensiunea inițială în circuit deschis	Tensiunea inițială la debitare	Rezistența de încărcare	Rezistența de descărcare	Curent de descărcare	Regim de descărcare	Tensiunea finală	Capacitatea	Durata de funcționare
		V	V			mA		V	Ab	h
A..	BUL	1,5	1,25	5	5	-	continuu	0,6	0,25	1,5
B..	BUL	1,5	1,3	5	1,3	-	continuu	0,6	0,6	3
C..	BVA	1,5	1,3	5	-	5	intermitent 1h/zi	0,6 U ₁	1,2	240
D..	BVA	1,5	1,3	5	-	15	intermitent 1h/zi	0,6 U ₁	0,6	240
E..	EUT	1,5 min.	1,35	5	15	-	continuu	0,7	16	240
Ea..	EUT	1,5 min.	1,40	5	10	-	continuu	0,7	35	350
F..	EUT	1,5 min.	1,40	5	10	-	continuu	0,7	30	300
G..	EUFR	1,5 min.	1,45	5	5	-	continuu	0,7	50	250
H..	EUFR	1,5 min.	1,45	5	-	200	intermitent 1h/zi	0,7	300	circa 1500
						300	intermitent 1h/zi	0,7	500	circa 1500

Bateriile anodice sînt supuse unui regim de descărcare intermitent, cu un curent constant (tabela 14), cîte patru ore pe zi pînă cînd tensiunea scade pînă la 60 % din valoarea inițială (tensiunea indicată pe baterie). Se va folosi un voltmetru de precizie cu o rezistență de cel puțin 500 Ω/V .

3) Elemente E.U.T. Elementul este supus unui regim de descărcare continuă, prin rezistențe fixe, a căror valoare este indicată în tabela 13. Tensiunile se vor nota în primele opt ore ale primei zile, din oră în oră și apoi din 24 în 24 ore, socotite de la începutul încercării. Descărcarea se va face pînă la tensiunea finală de 0,7 V. Cu valorile tensiunilor notate luate ca ordonată și cu orele notate luate ca abscisă, se va trasa o curbă. Prin planimetrare se va deduce capacitatea respectivă în amperore.

γ) Elemente E.U.F.R. Elementele vor fi supuse unui regim de descărcare intermitent, cu un curent constant (tabela 14) cîte patru ore pe zi, pînă cînd tensiunea scade la 0,7 V. Curbele nu trebuie să prezinte neregularități sau scăderi brusce. Valoarea capacității pentru elementul corespunzător nu trebuie să fie mai mică decît aceea indicată în tabela 14.

50. Execuții speciale ale elementelor uscate D.M., D.O. și D.M.O. Numeroasele întrebuintări ale acestor elemente fac ca forma lor să varieze destul de mult. Variaza forma vasului de zinc și a păpușii (fig. 21).

Elemente pastilă (galeți). O execuție cu totul specială este cea folosită pentru scopuri necesitănd tensiuni relativ mari și dimensiuni mici. Aceste baterii se asamblează din elemente, a căror masă depolarizantă este presată sub forma de pastile (galeți) (fig. 25). Asamblarea bateriei se face sub forma unei coloane din elemente suprapuse, astfel că partea superioară a unui electrod este în contact cu partea

inferioară a celui alt electrod (fig. 26). Pentru ca cei doi electrozi să nu formeze elemente parazitare se utilizează electrozi de zinc, numiți bipolari, constituiți dintr-o lamă de zinc, la care pe partea care vine în contact cu celălalt electrod s-a presat un strat subțire de amestec de grafit cu negru de fum (de acetilenă) cimentat cu colofoniu și ulei de ricin (fig. 25). Acest amestec posedă o bună conductibilitate electronică, nu are de loc conductibilitate ionică, de asemenea nu este permeabil față de soluții apoase.

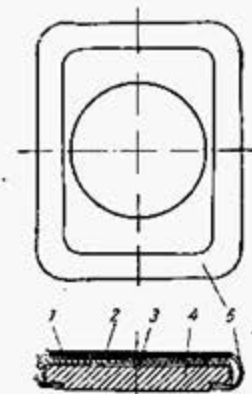


Fig. 25 - Element pastilă (galetă):

1 - strat de conductivitate electronică; 2 - placă de zinc; 3 - carton imbibat cu electrolit; 4 - masă depolarizantă; 5 - inel izolant din policlorură de vinil.

și un coeficient de utilizare de 80 %, putând lucra chiar cu 10 A/g - depolarizant cu randamente destul de bune. Această pilă se mai remarcă printr-o caracteristică $U = f(t)$ aproape complet orizontală.

Tensiunea la borne: 1,5-1,6 V.

Construcția. Elementul se compune dintr-o placă de zinc amalgamat (anodul) de 0,15-0,5 mm grosime, montat între două plăci de argint (catodi) care au pe părțile interioare câte un strat de pastă pe bază de oxid de argint și hidrat de potasiu (0,3-0,4 mm). Fiecare placă pozitivă (catod) este învelită în hirtie sugativă de 0,10-0,12 mm. Electrolitul celulei este o soluție apoasă de 20-40% hidrat de potasiu.

Avantaje: Capacitatea de masă a pilei cu peroxid de argint este de 0,04-0,10 Ah/g. Construcția pilei permite o stocare îndelungată în starea neactivată și nu degajă gaze la descărcare. După activare cu electrolit pila trebuie folosită în interval de 24-72 h.

Dezavantaje: elementul nu funcționează sub 0°C și peste 85°C.

β) **Elemente cu anod de magneziu înlocuind anodul de zinc.** Magneziul are un potențial normal de electrod de -2,4 V față de 0,76 V valoarea potențialului normal al zincului și fiind mult mai ușor are o capacitate de masă de 2 200 Ah/kg față de 815 Ah/kg a zincului. Magneziul este însă mult mai supus coroziunii decât

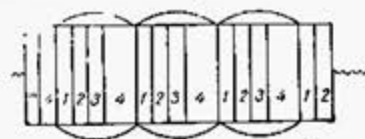


Fig. 26 - Schema unei baterii galetă.

zincul în electroliți uzuali (NH_4Cl) și se pasivează în o serie de alți electroliți (alcalini, acid cromic, etc.).

Electrodul de magneziu poate înlocui în principiu electrodul de zinc în pilele uscate obținându-se o capacitate specifică de două ori mai mare.

Construcția folosită azi este următoarea: anodul este dintr-un aliaj de magneziu cu 1% zinc, 0,2% mangan, 3% aluminiu și 0,15% calciu. Catodul este o masă depolarizantă normală cu bioxid de mangan și negru de fum, iar electrolitul este o soluție de bromură de magneziu imobilizată prin procedee normale (v. § 46).

Pilele cu electrozi de magneziu se livrează uneori fără electrolit. Umplerea cu electrolit (activarea) se face numai în momentul utilizării, necesitând golirea elementului dacă utilizarea se întrerupe înainte de descărcarea completă a elementului.

γ) **Pile cu depolarizant oxid de mercur** (fig. 27).

Față de elementele D.M., D.O. și D.M.O. prezintă avantajul unui coeficient de utilizare a maselor active mult mai mare (de ordinul 80-90%) prezentând deci o capacitate de volum și de masă de 4-5 ori mai mare.

Sistemul electrochimic este constituit din:

(-) $\text{Zn} | (\text{KOH}) | \text{HgO} | \text{C} (+)$; f.e.m. = 1,3...1,5 V.

Densitățile de curent admise sînt de același ordin ca la pilele D.M. și D.M.O.

Capacitatea de masă este uneori de 7 ori mai mare decât cea a pilelor D.M. și D.M.O. grație unei construcții foarte compacte, după cum se poate vedea din tabela 15.

Această pilă poate suporta lungi perioade de conservare în condiții severe de temperatură și umiditate.

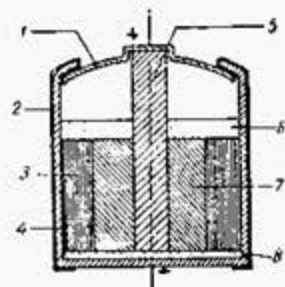


Fig. 27 - Pila cu depolarizant oxid de mercur:

1 - capac metalic (alamă); 2 - strat izolant; 3 - hirtie absorbantă imbibată cu electrolit; 4 - electrod de zinc (pahar); 5 - electrod de carbon; 6 - strat neconductor; 7 - masă depolarizantă; 8 - disc izolant.

Tabela 15

Densitatea curentului de descărcare, mA/mm ²	Capacitatea Ah	Dimensiuni mm	Greutate g
30	420	ø 21 x 13	11
40	620	ø 31 x 13	15
70	1 200	ø 31 x 13	33

Amestecul depolarizant este presat din oxid de mercur cu 10% grafit. Electrolitul este o soluție de 30...50% KOH conținând 15...17 g oxid de zinc (în 100 g KOH).

E. Elemente galvanice secundare

a) Acumulatori electrice cu plăci de plumb

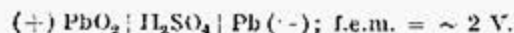
52. **Clasificare.** Construcția acumulatorilor cu plăci de plumb variază cu condițiile în care funcționează. În acest sens, se deosebesc următoarele tipuri principale de acumulatori: 1) de pornire a motoarelor și iluminatul și deservirea

aparatele electrice ale autovehiculelor (acumulatoare pentru automobile și motociclete) (fig. 65—66); 2) pentru tracțiune (locomotive, electrocare și alte vehicule cu acumulatori) (fig. 72); 3) pentru iluminatul trenurilor (fig. 71); 4) pentru telecomunicații cu fir (centrale telefonice, aparate de telegrafie, de semnalizare etc.) și fără fir (aparate de radio-recepție, de radio-emisie, de amplificare etc.) (fig. 60, 61 și 62); 5) pentru circuitele de curent continuu ale uzinelor electrice (fig. 68); 6) pentru uzul laboratoarelor (fig. 63); 7) pentru marină; 8) pentru aviație; 9) pentru iluminatul portativ (lămpi de mină, etc.).

Deosebiri esențiale dintre toate tipurile enumerate de acumulatoare constau în tipul plăcilor întrebuințate, în distanța dintre plăci, în separația dintre ele, construcția și dimensiunile vaselor, concentrația electrolitului, construcția dopurilor și în alți factori de mai mică însemnătate. Unele tipuri se deosebesc prin majoritatea acestor factori; la altele deosebirea cuprinde numai unul sau doi din factorii enumerați.

Întrebuințările acumulatoarelor de plumb în stadiul de dezvoltare de azi a tehnicii sînt foarte numeroase. Producția anuală mondială poate fi evaluată la sute de mii de tone plăci (electrozi) de plumb.

53. Sistemul electrochimic și principiul de funcționare. α) Sistemul electrochimic este constituit din:



Reacțiile de funcționare sînt practic reversibile, ceea ce permite întrebuințarea acestui sistem pe o scară industrială mare ca acumulator de energie electrică.

β) *Principiul de funcționare.* Un acumulator cu plăci de plumb este format dintr-un pol pozitiv, un pol negativ și un electrolit, așezați într-un vas denumit deseori bac, monobloc etc. Electrocul pozitiv, ca și cel negativ, se compune dintr-una sau mai multe plăci de plumb, legate între ele și purtînd pe ele materia activă, care, prin reacții chimice, generează, immagazinează și restituie energia electrică. Materia activă de la polul pozitiv al unui acumulator încărcat este bioxidul de plumb (PbO_2). La polul negativ al acumulatorului, materia activă este plumbul spongios. Prin descărcare, atât bioxidul de plumb cit și plumbul spongios se transformă în sulfat de plumb iar la recărcare, materiile active ale acumulatorului revin în stare inițială, trecînd din nou în bioxid de plumb la electrodul pozitiv și în plumb spongios la electrodul negativ.

Electrolitul acumulatorului de plumb este o soluție de acid sulfuric de concentrație de 20—30%. Vasul acumulatorului poate fi de sticlă, de lemn căptușit cu plumb, de ebonită sau de alt material plastic neatacat de acidul sulfuric. În general, celula unui acumulator de plumb este formată din mai multe plăci negative și pozitive, așezate astfel încît o placă pozitivă să fie înconjurată de două plăci negative, plăcile din margine fiind totdeauna negative. Plăcile negative se leagă în paralel între ele, formînd electrodul negativ al acumulatorului; tot astfel se leagă între ele și plăcile pozitive formînd electrodul pozitiv al acumulatorului. Pentru micșorarea rezistenței interioare a acumulatorului, trebuie micșorată distanța dintre plăci. Acest lucru permite și micșorarea volumului total al acumulatorului. Apropiînd mult plăcile una de alta, există pericol de scurtcircuit. Pentru a se evita acest lucru, plăcile se separă între ele prin separatoare constituite din planșete de lemn sau din foi de material plastic (ebonită, materiale sintetice etc.); uneori cele două feluri de separatoare se întrebuințează împreună.

Tensiunea dată de o celulă de acumulator este de aproximativ 2 V. Pentru tensiuni mai mari, se construiesc baterii formate din mai multe celule, legate între ele în serie. Astfel se pot deosebi și la acumulatoare elementele și bateriile. Elementele

sînt formate de obicei din mai multe plăci pozitive și negative, iar bateriile din legarea mai multor elemente în serie (fig. 28).

54. Procesele electrochimice în acumulatorul cu plăci de plumb. Procesele electrochimice care au loc în acumulator nu sînt bine cunoscute, iar între

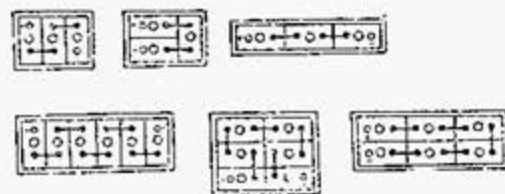


Fig. 28. — Legarea elementelor de acumulatoare în baterii pentru automobile.

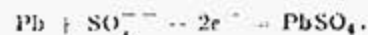
diferitele reacții propuse există unele deosebiri, care se referă mai ales la procesele care au loc pe placa pozitivă. Printre teoriile emise, teoria dublei sulfatări (1882) a primit o recunoaștere aproape unanimă.

Conform acestei teorii, masa activă a celor doi electrozi, care la un acumulator complet încărcat este formată la electrodul pozitiv din peroxid de plumb (PbO_2) și la electrodul negativ din plumb spongios trece, la descărcare, în sulfat de plumb.

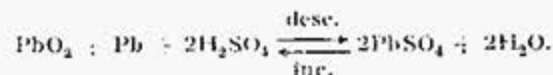
Reacțiile la descărcare și încărcare se petrec după următoarea schemă:
La electrodul pozitiv:



La electrodul negativ:

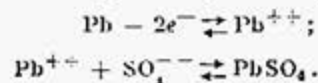


Reacția totală fiind:



După cum se vede, la descărcare, în locul acidului sulfuric, în electrolit apare apa, ceea ce face ca densitatea electrolitului să scadă. La încărcare, din cauza consumului moleculelor de apă și a reformării acidului sulfuric, densitatea electrolitului crește. Această variație a densității electrolitului în timpul descărcării și încărcării servește, în timpul exploatarei, la determinarea stării de descărcare sau încărcare a acumulatorului.

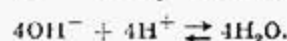
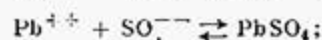
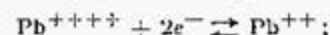
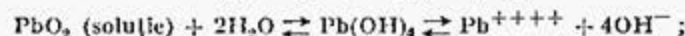
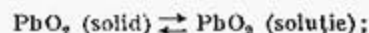
Procesul la electrodul negativ se petrece după următoarea schemă:



Concomitent cu trecerea atomului de plumb de la electrod, în soluție sub formă de ion, rămîn pe electrod două sarcini negative (doi electroni) libere. Sulfatul de plumb care se formează, din cauza solubilității sale mici, se depune pe electrod.

La electrodul pozitiv procesul poate fi reprezentat prin următoarea schemă: peroxidul de plumb trece în soluție, formînd hidrat de plumb tetravalent, care se disociază. Plumbul tetravalent primește prin circuitul exterior cei doi electroni

eliberați la anod și trece în plumb bivalent, care în prezența ionilor SO_4^{--} se transformă în sulfat de plumb și se depune pe electrod:



În total, ecuația obținută pentru procesul sumat dela electrodul pozitiv este:

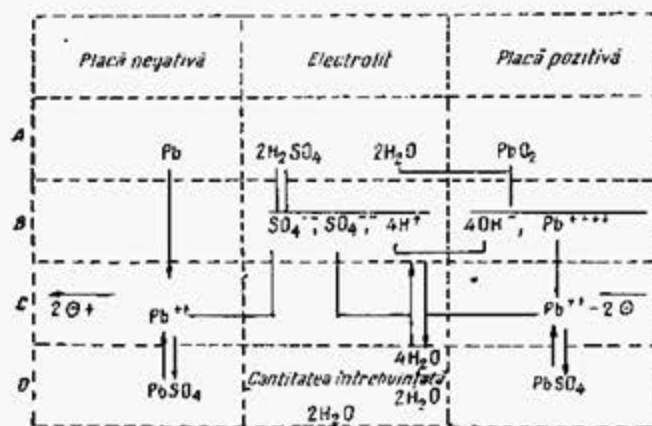
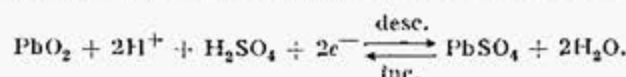


Fig. 29. — Schema reacțiilor în timpul descărcării acumulatorului cu plăci de plumb.

La încărcare, procesele decurg în sens invers.

În fig. 29 și 30 sînt arătate schematic procesele care au loc la cei doi electrozi în timpul descărcării și încărcării acumulatorului cu plăci de plumb.

Proba hotărîtoare în favoarea teoriei dublei sulfatări constă în concordanța valorii măsurate a f.e.m. a acumulatorului cu plăci de plumb, cu cea calculată după această teorie.

55.) F.e.m. a acumulatorului cu plăci de plumb. Pe baza teoriei dublei sulfatări se poate calcula f.e.m. a acumulatorului cu plăci de plumb fie prin calculul potențialelor celor doi electrozi, fie prin datele termochimice ale sistemului.

a) Potențialul electrodului pozitiv față de electrolit este dat de reacția procesului de oxidare-reducere a plumbului tetravalent și bivalent:

$$V_{(+)} = V^0 + \frac{0,058}{2} \lg \frac{[\text{Pb}^{++++}]}{[\text{Pb}^{++}]}.$$

V^0 — potențialul normal al acestui proces, la temperatura normală (25°C), este egal cu $+1,69$ V (tabela 2). Concentrațiile 1) ionice $[\text{Pb}^{++++}]$ și $[\text{Pb}^{++}]$ la aceeași temperatură pot fi determinate pe baza solubilității bioxidului de plumb și a sulfatului de plumb. S-au stabilit următoarele valori ale acestor concentrații:

$$[\text{Pb}^{++++}] = 0,91 \cdot 10^{-4}, \text{ în soluție de } 4,88\text{N } \text{H}_2\text{SO}_4$$

și:

$$[\text{Pb}^{++}] = 4 \cdot 10^{-8}.$$

Potențialul electrodului negativ este determinat de ionizarea plumbului $\text{Pb} - 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{++}$, potențialul normal al acestei reacții fiind egal cu $-0,126$ V (tabela 1):

$$V_{(-)} = -0,126 + \frac{0,058}{2} \lg [\text{Pb}^{++}].$$

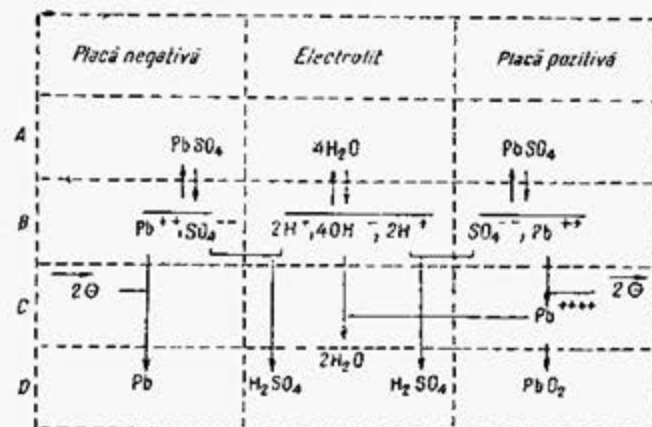


Fig. 30. — Schema reacțiilor în timpul încărcării acumulatorului cu plăci de plumb.

Valoarea f.e.m. E va fi deci:

$$E = V_{(+)} - V_{(-)} = \left(+1,69 + \frac{0,058}{2} \lg \frac{[\text{Pb}^{++++}]}{[\text{Pb}^{++}]} \right) - \left(-0,126 + \right. \quad (55.1)$$

$$\left. + \frac{0,058}{2} \lg [\text{Pb}^{++}] \right) = +1,816 + 0,029 \lg \frac{[\text{Pb}^{++++}]}{[\text{Pb}^{++}]^2}; \quad (55.2)$$

de unde:

$$E = +1,816 + 0,029 \lg \frac{0,91 \cdot 10^{-4}}{(4 \cdot 10^{-8})^2} = 2,012 \text{ V.} \quad (55.3)$$

¹⁾ v. § 4

3) *Calculul termochimic al f.e.m.* Conform formulei (19.1):

$$E = \frac{\theta}{23\,060\,n} + T \frac{dE}{dT},$$

este necesar a se cunoaște căldura de reacție θ a reacției dublei sulfatări și coeficientul de temperatură $\frac{dE}{dT}$. Întrucât reacția decurge în soluția apoasă de acid sulfuric, trebuie luată în considerație și căldura de diluare a soluției, care rezultă din formarea în timpul descărcării, a două molecule de apă și din dispariția a două molecule de acid sulfuric.

B. N. Kabanov a efectuat calculul căldurii reacției obținând pentru θ valoarea de 120,5 kcal, fără a lua în considerație căldura de diluare a acidului. El a calculat apoi și căldurile diferențiale de diluare a acidului sulfuric θ_1 și a apei θ_2 obținând următoarele valori:

H ₂ SO ₄ mol/l	0,2	0,5	1,3	2,0	3,0	4,0	5,0	7	Fără apă
θ_1 , în kcal	17,2	17,5	17,9	18,35	18,8	19,25	19,7	20,1	0
θ_2 , în kcal	—	—	—	—	0,08	0,21	0,32	0,45	8,9

Coeficientul de temperatură al f.e.m. $\frac{dE}{dT}$ a fost determinat de diverși cercetători. S-a stabilit că acest coeficient depinde de concentrație (tabela 16) și în mică măsură de temperatură. Coeficientul de temperatură a fost stabilit și experimental, temperatura electrolitului (de greutate specifică 1,28 g/cm³) variind între +20°C și -72°C; s-au obținut următoarele valori ale f.e.m. (acumulatorul complet încărcat):

Temp [°C]	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20
F.e.m. [V]	2,061	2,067	2,073	2,079	2,085	2,091	2,097	2,103	2,109	2,115

Coeficientul de temperatură stabilit este 0,000 398 V/°C și este totdeauna pozitiv.

Pe baza datelor de mai sus se poate calcula de exemplu f.e.m. a acumulatorului la 17°C, concentrația electrolitului fiind de 3 mol/l (greutatea specifică = 1,18 g/cm³):

$$E = \frac{\theta'}{23\,060} + 290 \frac{dE}{dT};$$

$$\theta' = \theta - 2\theta_1 + 2\theta_2 = 120,5 - 31,2 + 0,16 = 89,46 \text{ kcal.}$$

Pentru această concentrație, $\frac{dE}{dT} = 0,000\,4$;

$$E = \frac{89\,460}{46\,120} + 290 \cdot 0,000\,4 = 2,025 \text{ V.}$$

Valoarea coeficientului de temperatură al acumulatorului determină în mare măsură temperatura lui la încărcare, la descărcare și în procesul de formare a plăcilor.

Cantitatea de căldură produsă la încărcare sau absorbită la descărcare este:

$$Q = 0,24 \, T \frac{dE}{dT} I \text{ kcal/s:}$$

Aici, I se ia în amperi, iar T în grade Kelvin.

γ) *Variația f.e.m. a acumulatorului de plumb în funcție de concentrația și temperatura electrolitului* este dată de ecuațiile:

$$E = 2,04 + 0,029 \lg [H_2SO_4]^2 \quad (55.4)$$

și:

$$E = E_0 + at + bt^2, \quad (55.5)$$

în care E_0 este f.e.m. măsurată la 0°C, iar a și b coeficienți de temperatură (valorile lor sînt arătate în tabela 16).

Pe baza relației (55.4) s-a calculat f.e.m. a acumulatorului de plumb pentru diferite concentrații de acid sulfuric (tabela 16).

Tabela 16. Variația f.e.m. a acumulatorului de plumb în funcție de concentrație și de coeficientul de temperatură a și b

Concentrația H ₂ SO ₄ , mol/kg	E_0°	$a \cdot 10^6$	$b \cdot 10^6$
0,05	1,76874	-310	124
0,1	1,80207	-265	129
0,5	1,87916	-45	126
1,0	1,91737	56,1	108
2,0	1,96037	159	103
3,0	2,00874	178	97
4,0	2,04789	177	91
5,0	2,08502	167	87
6,0	2,11910	162	85
7,0	2,15971	151	80

S-a calculat de asemenea și valoarea f.e.m. de echilibru (f.e.m. normală) a acumulatorului corespunzând concentrației de 3,65 mol/kg, conform relației:

$$E_i = 2,007\,95 + 0,001\,237 \, t + 0,000\,002\,5 \, t^2,$$

ceea ce, pentru 25°C, dă $E = 2,041 \text{ V}$.

Dependența f.e.m. de concentrația C (sau greutatea specifică d) a electrolitului este dată și de următoarele formule empirice:

$$E = 1,92 + 0,15 \lg C \text{ [g-mol/l]}$$

la 0°C:

$$E = 1,92 + 0,120 \lg C + 0,001 \, C,$$

ar pentru valorile greutății specifice d cuprinse între 1,05 și 1,3 se dă relația empirică:

$$E = 0,85 + d.$$

Tabela 17. Variația f.e.m. în funcție de concentrația electrolitului

Greutatea specifică H ₂ SO ₄	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250	1,300	1,400
F.e.m., în V	1,906	1,965	2,010	2,051	2,094	2,142	2,233

56. **Rezistența acumulatorului cu plăci de plumb.** α) *Rezistența interioară totală* a unui acumulator se compune din f.e.m. de polarizare și din rezistențele ohmice ale electrozilor, electrolitului și ale diferitelor contacte (la borne etc.). Efectul de rezistență datorit polarizării a fost arătat în § 27.

β) *Rezistența ohmică.* Dintre factorii care contribuie la valoarea rezistenței ohmice valoarea cea mai mare o are rezistența soluției electrolitului, atât în vasul acumulatorului cât și în porii masei active.

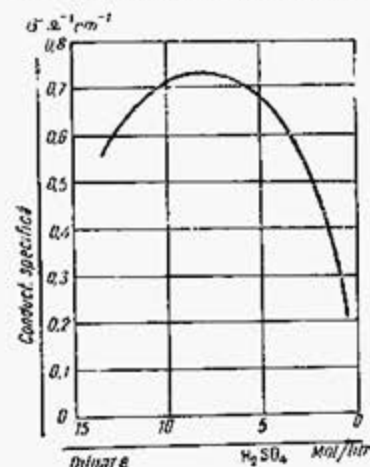


Fig. 31. - Variația conductibilității specifice a H_2SO_4 în funcție de concentrație.

Din datele arătate în fig. 31 urmează că soluția de greutate specifică 1,20 (~7 mol/l) are conductivitatea cea mai mare și că deci concentrația folosită în practică este în jurul acestei valori.

Variația rezistenței soluțiilor apoase de acid sulfuric cu temperatura se calculează cu ecuația:

$$R_t = R_{20} [1 - \alpha (t - 20^\circ)],$$

în care α este coeficientul de temperatură (0,014 - 0,018).

Rezistențele celorlalte părți ale acumulatorului sînt mici în comparație cu rezistența electrolitului. Astfel, pentru plumb

spongios ea este de circa $10^{-4} \Omega/cm$, iar pentru PbO_2 de $0,25 \Omega/cm$. Rezistența separatorilor se exprimă în mod deosebit în Ω pe dm^2 de suprafață. Pentru cele de lemn ea variază între 0,003 - 0,008 Ω/dm^2 .

γ) *Calcularea valorii rezistenței acumulatorului.* În general, valoarea rezistenței interioare a acumulatorilor cu plăci de plumb nu este mare; ea este de ordinul de 0,01 - 0,001 Ω , variind cu construcția și dimensiunile lor. Rezistența interioară se micșorează în timpul încărcării și se mărește în timpul descărcării. Rezistența interioară crește, mai ales în cazul sulfatării plăcilor, deoarece prin formarea cristalelor mari de sulfat de plumb, se produce deslipirea de grătar a masei active.

Pentru calcularea rezistenței interioare totale a acumulatorilor cu plăci de plumb, se poate folosi o formulă empirică:

$$r_a = \frac{0,1 \cdot 0,2}{0,7 C_{Ah}} [\Omega],$$

în care C este capacitatea în Ah pentru un regim de descărcare de 10 ore. Numărătorul variază între 0,1 și 0,2, în funcție de distanța dintre plăci și concentrația acidului.

δ) *Determinarea rezistenței acumulatorilor cu plăci de plumb.* Rezistența interioară totală sau efectivă r_a a acumulatorului este cea care se opune la trecerea curentului continuu (v. § 27). Expresia ei este dată de formula (27.1):

$$r_a = r + \frac{E_p}{I}$$

în care: E_p este forța contraelectromotoare de polarizare; r_a se determină prin metoda ampermetrului și voltmetrului conform relației (27.4 și 27.5):

$$r_a = \frac{E \mp U}{I}$$

în care: E este f.e.m. a acumulatorului;

U - tensiunea la borne;

I - intensitatea curentului care traversează acumulatorul. Semnele $\pm$ și $\mp$ arată regimul de descărcare respectiv de încărcare, la care se face măsurătoarea.

Rezistența electrică propriu zisă (ohmică) r a acumulatorului este suma rezistențelor părților traversate de curent fără ca aceste părți să dea naștere la f.e.m. de polarizare E_p ; r se determină prin metoda punții alimentată în curent alternativ de frecvență muzicală.

Determinarea rezistenței interioare totale r_a . Montajul folosit este cel indicat în fig. 32, iar modul de măsurare este următorul:

a) Se măsoară f.e.m. a acumulatorului Ac cu întrerupătorul I_2 deschis.

b) Acumulatorul se conectează pentru încărcare și cu ajutorul reostatului de încărcare se reglează intensitatea de curent I_1 citindu-se tensiunea U_1 ; rezultă:

$$r'_a = \frac{U_1 - E}{I_1}$$

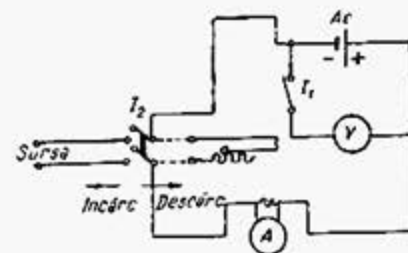


Fig. 32. - Schema de măsurare în curent continuu a rezistenței interioare a acumulatorului.

c) Se mai citesc două valori I_2 și I_3 cărora le corespund tensiunile U_2 și U_3 :

$$r''_a = \frac{U_3 - U_2}{I_3 - I_2}$$

d) Se procedează la fel pentru curenții de descărcare I_4 , I_5 și I_6 :

$$r'''_a = \frac{E - U_4}{I_4} \text{ și } r''''_a = \frac{U_5 - U_6}{I_5 - I_6}$$

Valoarea medie a rezistenței totale r_a va fi:

$$r_{a \text{ mediu}} = \frac{r'_a + r''_a + r'''_a + r''''_a}{4}$$

Determinarea rezistenței ohmice. Puntea de curent alternativ pentru măsurarea de capacități poate fi întrebuințată și pentru măsurarea rezistenței ohmice r a acumulatorilor (sau a pilelor). Fig. 33 reprezintă schematic această punte. Brațele sînt notate cu literele A_1 , A_2 , A_3 și A_4 . Condensatorul C_2 are o valoare cunoscută; condensatorul C_1 este variabil, pentru a compensa capacitatea bateriei. Rezistențele R_3 și R_4 sînt egale, iar R_2 este o rezistență de valoare mică, fixă. R_1 este o rezistență variabilă, neinductivă, a cărei valoare

depinde de rezistența bateriei și a altor rezistențe din circuit. Ecuația de echilibru se scrie astfel:

$$A_2 A_3 - A_1 A_4 = 0.$$

adică:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{C_2}{C_1}.$$

de unde:

$$R_1 = \frac{R_2 C_2}{C_1}.$$

Dacă se introduce bateria în circuit, rezistența brațului A_1 devine egală cu $R_1 + r$ și valoarea lui poate fi determinată făcând două măsurători succesive, bateria fiind scoasă și apoi introdusă în circuit. Valoarea C_1 este diferită la cele două măsurători. Dacă bateria se descarcă pe un circuit local (rezistența R_5) trebuie să se țină seama, în ecuația lui R_1 , de valoarea acestei rezistențe în derivație.

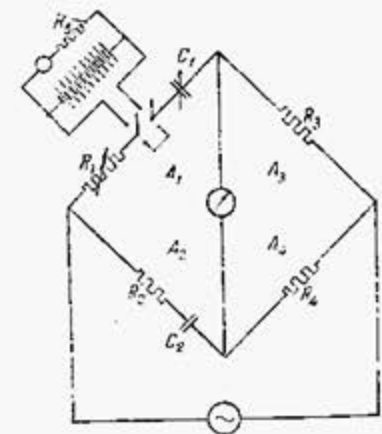


Fig. 33. — Punte de curent alternativ pentru măsurarea rezistenței ohmice a acumulatorului.

O altă metodă (fig. 34) întrebuințează o punte de rezonanță în care reactanța capacității acumulatorului este echilibrată printr-o inductanță. Capacitatea electrostatică a acumulatorului este calculată după variația inductanței când acumulatorul este sau nu în circuit. Pentru alimentarea punții trebuie să se dispună de o sursă de curent alternativ constantă și perfect sinusoidală; sint de asemenea necesare rezistențe și inductanțe variabile preciz elalonate.

Principiul determinării valorii rezistenței ohmice a acumulatorului este următorul:

Impedanța Z a circuitului de rezistență r și reactanță $\frac{1}{\omega C}$ este:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Valoarea pătratului rezistenței este foarte mică în raport cu pătratul reactanței. Pentru a elimina influența capacității se introduce în circuit o inductanță, astfel ca:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

În aceste condiții impedanța circuitului devine egală cu rezistența:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = r.$$

Este suficient deci de a echilibra puntea cu acumulatorul introdus în circuit și scos din circuit pentru a obține, prin diferență, valoarea rezistenței r . Când bateria este scoasă din circuit, se intercalează în locul ei o rezistență foarte mică (de mercur). În urma acestei înlocuiri, având în vedere capacitatea electrostatică importantă a acumulatorului, puntea trebuie echilibrată din nou prin variația inductanței. În acest fel se poate determina și capacitatea electrostatică a acumulatorului. Măsurătorile se pot face fie cu acumulatorul în repaos, fie când el debitează pe un circuit (neinductiv) de consum. Rezistențele R_1 și R_2 (fig. 34) sint neinductive de mică valoare și servesc pentru a stabili raportul dorit între brațele punții; R_3 este o rezistență variabilă care permite stabilirea echilibrului; C este un condensator care împiedică descărcarea acumulatorului în circuitul punții; L este o inductanță variabilă; B este bateria de acumulatori cercetată, R_4 este o rezistență variabilă, neinductivă, servind ca o rezistență de compensație, când acumulatorul este scos din circuit și înlocuit printr-un conductor. Sursa de curent este un oscilator electronic de 5 W, iar în circuitul instrumentului de zero se introduce un amplificator pentru a ușura căutarea echilibrului.

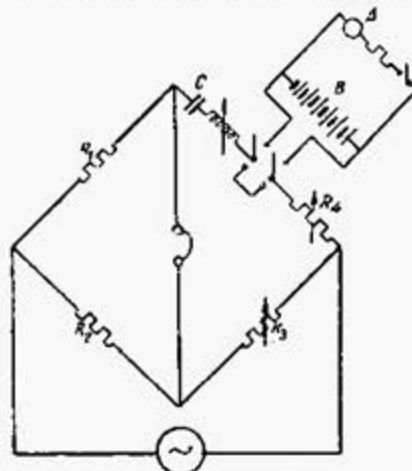


Fig. 34. — Punte de rezonanță pentru măsurarea rezistenței ohmice a acumulatorului.

57. Caracteristicile $U = f(t)$ la descărcarea și la încărcarea acumulatorului cu plăci de plumb. Tensiunea la bornele acumulatorului variază în timpul descărcării conform expresiei:

$$U_d = E - Ir_a - E_p,$$

iar în timpul încărcării:

$$U_i = E + Ir_a + E_p.$$

Practic f.e.m. E a acumulatorului nu variază la cele două regimuri de funcționare decât din cauza variației densității acidului.

Pe măsura avansării procesului de descărcare sau încărcare, rezistența ohmică a acumulatorului r crește relativ puțin, însă fenomenele de polarizare E_p devin importante ceea ce provoacă o coborîre a tensiunii la borne U în timpul descărcării și o creștere a ei în timpul încărcării. Deoarece fenomenele de polarizare depind de mai mulți factori (v. § 24), variația tensiunii la borne în timpul descărcării și încărcării acumulatorului decurge în mod diferit, însă caracterul ei rămîne mereu același, reprezentat schematic în fig. 35 și 36.

a) Caracteristica $U = f(t)$ la încărcarea acumulatorului: tensiunea acumulatorului la început crește brusc de la 2,1 V pînă la 2,17 V, apoi scade repede pînă la 2,13 V¹⁾, după care începe faza principală a încărcării, în timpul căreia tensiunea crește încet pînă la 2,2 V. La atingerea valorii de 2,2–2,3 V, începe o degajare de gaze pe electrozi și tensiunea urcă relativ repede la 2,6–2,7 V când devine staționară. În această fază are loc electroliza apei. După ce tensiunea rămîne

¹⁾ Această fază nu este reprezentată în fig. 35 (din cauza duratei scurte). Ușoara cădere de tensiune de la începutul încărcării se datorește fazei de dizolvare a stratului superficial de sulfat de plumb produs în timpul păstrării acumulatorului descărcat.

staționară un anumit interval de timp (2 ore), prelungirea încărcării nu mai este utilă (fig. 35).

După deconectarea acumulatorului de la sursa de încărcare, tensiunea la borne scade destul de repede până la o valoare care depinde de concentrația acidului și care pentru concentrațiile uzuale de 25–35 % este de 2–2,15 V. La această tensiune începe de obicei descărcarea acumulatorului.

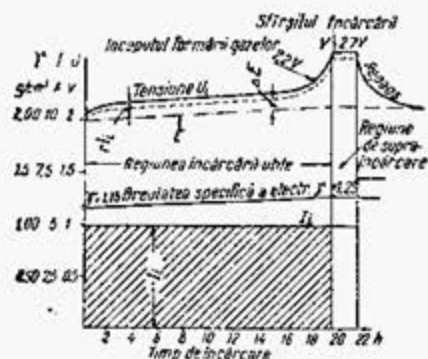


Fig. 35. — Caracteristicile de încărcare a acumulatorului cu plumb.

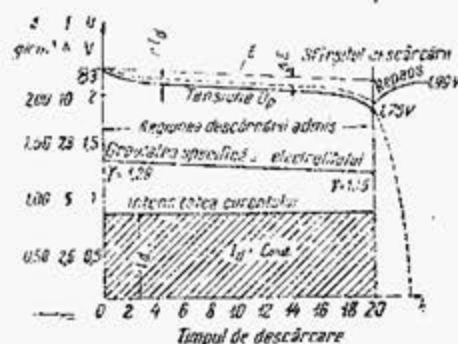


Fig. 36. — Caracteristicile de descărcare a acumulatorului cu plumb.

β) Caracteristica $U = f(t)$ la descărcarea acumulatorului (cu intensitate de curent normală): tensiunea scade repede de la 2–2,15 V până la 1,92 V. Ea rămâne apoi aproape constantă pe tot timpul furnizării capacității nominale, coborînd foarte încet până la 1,75–1,8 V, cînd căderea devine iarăși rapidă, tensiunea la borne tinzînd spre zero (fig. 36).

γ) Diferența dintre caracteristicile de încărcare (fig. 35) și descărcare (fig. 36) nu poate fi explicată numai prin căderea de tensiune datorită rezistenței interioare, cădere apreciată la cîteva zecimi de volt. Cauza principală constă în polarizarea electrozilor; astfel în timpul încărcării și descărcării acumulatorului, variația concentrației electrolitului este mult mai mare în porii masei active decît în electrolitul din vas și anume, în cazul intensităților nominale de curent, concentrația în porii masei active în timpul încărcării este cu 20–30 % mai mare, iar în timpul descărcării cu 10 % mai mică, decît cea din vas a cărei variație este reprezentată în fig. 35 și 36 prin curbele $\gamma = f(t)$.

Variația concentrației în porii masei active este arătată împreună cu curbele de încărcare și descărcare.

Polarizarea electrozilor depinde mult de densitatea curentului. Cînd densitatea de curent crește, curba de încărcare urcă mult mai rapid, iar cea de descărcare coboară mai repede (fig. 37). Ambele fenomene se datoresc faptului că

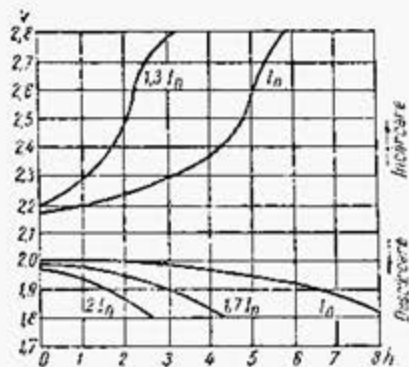


Fig. 37. — Influența intensității curentului asupra caracteristicilor de descărcare și încărcare.

difuzia electrolitului între vas și porii masei active rămîne din ce în ce mai în urmă față de viteza reacției.

58. Capacitatea acumulatorilor cu plăci de plumb (în Ah sau Wh) depinde de cantitatea de masă activă introdusă în acumulator. Astfel, conform ecuației dublei sulfatări, pentru fiecare Ah sînt necesare: 3,866 g Pb, 4,463 g PbO_2 și 3,660 g H_2SO_4 . Aceste valori sînt valabile pentru un coeficient de utilizare egal cu unitatea. În practică acest coeficient variază între 25 % și 50 % (rareori 60 %). Utilizarea cit mai mare a maselor active formează una din principalele probleme în construcția acumulatorilor.

α) Efectul construcției plăcilor asupra capacității acumulatorilor. Într-un acumulator de dimensiuni date, se pot monta mai multe plăci subțiri decît plăci groase, deci cu suprafață totală mai mare. S-a putut stabili că dacă se sporește numărul de plăci, capacitatea acumulatorului pe unitatea de suprafață a electrodului scade, dar capacitatea totală se mărește.

Relația generală dintre capacitatea acumulatorului și grosimea plăcilor este dată de formula empirică:

$$C = \frac{M}{1 + \alpha d l} \quad (58.1)$$

în care: M și α sînt constante constructive, d este grosimea plăcilor, în mm, iar l , intensitatea curentului¹⁾.

Pentru cazul acumulatorilor staționare, formula se simplifică:

$$C = 0,083 \, s \sqrt{d} \quad (58.2)$$

în care: s este suprafața plăcilor în cm^2 ;

d — grosimea în mm.

Cu toate că plăcile subțiri asigură o capacitate specifică mare, subțierea plăcilor este limitată mai ales de condiții de rezistență mecanică. În diferitele construcții, grosimea plăcilor pastate variază între 1,5 și 2 mm (la acumulatori de aviație) pînă la 2,5–6,5 mm (la acumulatori de pornire și de tracțiune). Grosimea plăcilor staționare este de 8–16 mm (v. § 63).

β) Efectul porozității masei active. Porozitatea masei este raportul dintre volumul porilor și volumul total al masei (exprimat în %). Fiind cunoscute densitatea aparentă a masei d_1 și densitatea ei reală d_2 se folosește pentru calculul porozității p relația:

$$p = \left(1 - \frac{d_1}{d_2} \right) 100 \% \quad (58.3)$$

Întrebuințarea maselor active poroase mărește capacitatea plăcilor, mai ales în cazul intensităților mari de curent deoarece difuziunea electrolitului se face în straturile mai adînci ale plăcii. Porozitatea este însă limitată de considerații de rezistență mecanică. În practică ea nu depășește 50 %. Porozitatea plăcilor depinde de metoda de preparare a pastei și de procedeele de pastare și de formare.

În timpul încărcării și descărcării acumulatorului, porozitatea plăcilor variază. Sulfatului de plumb care se formează este mai puțin dens decît plumbul spongios sau peroxidul de plumb. De aceea în timpul descărcării volumul porilor

¹⁾ Pentru un tip de acumulator de construcție dată, la care se variază grosimea plăcilor respectiv suprafața lor totală în acumulator, valoarea constantelor M și α se află prin două măsurători succesive ale capacității la descărcare, executate cu aceeași densitate de curent:

$$C_1(I_1 \pm \alpha d_1 I_1) = C_2(I_2 \pm \alpha d_2 I_2) = M.$$

se micșorează; deci în cazul unei mase prea dense (neporoase), pe lângă fenomenele intense de polarizare, se pot produce dilatarea și separarea masei de grătarul suport.

γ) *Efectul intensității curentului.* Timpul de descărcare a acumulatorului (până la limita admisă) se scurtează cu mărirea intensității curentului de descărcare. Astfel, capacitatea $C = It$, la intensități de curent diferite ($I_1 > I_2$), variază ($C_1 < C_2$), nefiind însă proporțională cu variația intensității curentului de descărcare. Micșorarea capacității în watthore este mai mare decât aceea în amperore. Astfel capacitatea unui acumulator are o valoare comparabilă numai când se precizează intensitatea curentului de descărcare (regim de descărcare). Fabricile de acumulatori indică de obicei capacitatea pentru câteva regimuri.

Pentru cazul (cel mai frecvent) de descărcare cu intensitate de curent constantă, este valabilă următoarea relație între curentul de descărcare și timpul de descărcare:

$$I^n t = K, \quad (58.4)$$

în care: I este curentul de descărcare, în amperi;

t — durata descărcării, în ore;

n și K — constante care se determină pentru un anumit tip de acumulator, cunoscând valorile I și t pentru două regimuri de descărcare¹⁾.

În cazul unor descărcări cu întreruperi, capacitatea acumulatorului crește, deoarece în timpul repausului se produce egalizarea concentrației electrolitului.

Regimul optim trebuie să corespundă condițiilor de funcționare. În practică, în cazul plăcilor pastate, densitatea de curent admisă este de 0,3–0,8 A/dm², iar în cazul plăcilor de mare suprafață de 1,5–3 A/dm². Acumulatorile de pornire lucrează în timpul pornirii cu 50 A/dm², ceea ce coboară mult capacitatea și durata de funcționare.

δ) *Efectul concentrației electrolitului și a temperaturii.* Conductibilitatea maximă a soluției apoase de H₂SO₄ are loc la o concentrație de 30 % (greutatea specifică 1,22). Concentrația optimă variază însă cu construcția acumulatorului și se indică de fabrica constructoare. În principiu, concentrația trebuie să crească la creșterea grosimii plăcilor și cu intensitatea curentului de descărcare.

ε) *Urcarea temperaturii* până la anumite limite mărește capacitatea acumulatorului cu 1 % pentru fiecare °C față de temperatura normală de 15 °C. Influența urcării temperaturii se poate rezuma prin: a) micșorarea rezistenței electrolitului, b) creșterea f.e.m., c) mărirea vitezei de difuziune a electrolitului în pori plăcilor.

Coborrea temperaturii produce efecte contrarii: astfel, la -18 °C rezistența electrolitului este de trei ori mai mare decât la +4 °C; difuziunea este îngreunată, concentrația acidului în pori putând coborî la zero, iar apa care rămâne în pori îngheață ușor, cu toate că electrolitul din vas păstrează o concentrație normală. În acest scop, pentru funcționarea la temperaturi joase, se întrebuintează un electrolit de concentrație mai mare (39 % H₂SO₄).

Capacitatea la temperatura de referință de 25 °C se deduce din capacitatea obținută la o temperatură t° , cuprinsă între 10 °C și 40 °C, cu ajutorul formulei:

$$C_{25} = \frac{C_t}{1 + 0,008 (t^\circ - 25^\circ)}, \quad (58.5)$$

¹⁾ Constanta n se calculează măsurând capacitățile acumulatorului la două regimuri de descărcare I_1 și I_2 respectiv t_1 și t_2 . Conform formulei (58.4) avem:

$$n = \frac{\lg t_2 - \lg t_1}{\lg I_1 - \lg I_2}.$$

59. *Durata în serviciu a plăcilor.* În timpul exploatării acumulatorului, capacitatea lui crește la început. La plăcile de mare suprafață, această creștere durează primii doi până la cinci ani (750–1 500 cicluri); la plăcile pastate creșterea are loc la primele câteva zeci de cicluri. Această creștere se explică prin formarea porilor la plăcile pastate și îngroșarea stralului activ la plăcile de mare suprafață (v. § 63). Ea depinde mult de felul de exploatare a acumulatorului.

În a doua perioadă de funcționare, capacitatea descrește. Descreșterea se datorește fie faptului că masa activă a plăcilor negative devine din ce în ce mai compactă, fie, invers, dilatării masei active a plăcilor pozitive, provocând desprinderea ei de pe grătarul suport. Această a doua cauză este mult mai frecventă, ceea ce face ca plăcile pozitive să determine durata de funcționare a acumulatorilor cu plăci de plumb.

Când capacitatea acumulatorului scade sub 80 % din cea inițială, acumulatorul se consideră uzat.

60. *Randamentul acumulatorului cu plăci de plumb.* În mod practic, acumulatorul nu lucrează ca un element galvanic reversibil. Cantitatea de electricitate și energia necesare la încărcare sînt mai mari decât cele furnizate la descărcare din cauza reacțiilor secundare (ca descompunerea apei) și cele de autodescărcare.

Randamentul depinde și de regimul de încărcare și descărcare, mai ales când au loc supraîncărcări și supradescărcări.

Expresia randamentului în amper-ore este:

$$\eta_{Ah} = \frac{100 \int_0^{t_d} I_d \cdot t_d}{\int_0^{t_i} I_i \cdot t_i} = \frac{100 I_{dm} \cdot t_d}{I_{im} \cdot t_i},$$

în care: I_d și I_i sînt curenți de descărcare și încărcare;

t_d și t_i — durata de descărcare și încărcare;

m — indicele valorii medii.

Valoarea practică a η_{Ah} este de circa 85 %. Determinarea randamentului în Ah se face de obicei în felul următor: acumulatorul încărcat se descarcă cu un curent I , până la tensiunea fixată U . Apoi, la aceeași intensitate de curent, acumulatorul se încarcă cu cantitatea de electricitate obținută la descărcare. Urmează o nouă descărcare cu curentul I până la tensiunea finală U_f .

În exploatare, o mare importanță are randamentul în watthore, care caracterizează gradul de utilizare al energiei:

$$\eta_{Wh} = \frac{100 \int_0^{t_d} I_d \cdot U_d \cdot t_d}{\int_0^{t_i} I_i \cdot U_i \cdot t_i} = \frac{100 I_{dm} \cdot U_{dm} \cdot t_d}{I_{im} \cdot U_{im} \cdot t_i} = \eta_{Ah} \frac{U_{dm}}{U_{im}} = \eta_{Ah} \Delta,$$

în care: U_{dm} și U_{im} sînt tensiunile medii în timpul descărcării și încărcării;

Δ — coeficient de coborîre a tensiunii.

Conform expresiei de mai sus randamentul în energie, în afară de factorii care intervin în randamentul în amper-ore, depinde numai de caracteristicile de încărcare și de descărcare a acumulatorului.

În practică $\eta_{wh} = 65 \dots 75\%$.

61. Autodescărcarea acumulatorilor cu plăci de plumb¹⁾ (v. § 34) se datorește:

a) prezența impurităților metalice care prin depunerea la catod formează elemente parazitare, impuritățile cele mai active fiind: platina, aurul, argintul, nichelul, cobaltul, cuprul, fierul, antimoniu, arsenul și bismutul;

b) reacției secundare dintre electrolit și plumbul spongios (placa negativă): $Pb + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2$; această reacție devine cu atât mai activă, cu cât concentrația electrolitului este mai mare și temperatura lui mai ridicată;

c) lanțului electrochimic în scurtcircuit, format la placa pozitivă de bioxidul de plumb al masei active cu plumbul grătarului, în prezența soluției de acid sulfuric; procesul este activ mai ales la plăcile subțiri și poroase;

d) procesului de reducere a bioxidului de plumb la placa pozitivă, din cauza substanțelor organice conținute în separatoarele de lemn; acest proces devine activ la temperaturi peste 30°C.

62. Sulfatarea acumulatorilor în stare de repaus (descărcate). Procesul de sulfatare se manifestă prin apariția la electrozi a unor pete albe, care se transformă, după câteva săptămâni de repaus al acumulatorului (descărcat), într-o pojgblă de sulfat de plumb «neactiv»; la încărcare, sulfatul de plumb nu mai poate fi readus în peroxid de plumb și plumb spongios.

Fenomenul de sulfatare se explică în felul următor: în timpul repausului prelungit, sulfatul de plumb, format în timpul descărcării (sau în timpul autodescărcării — în timpul repausului) acumulatorului, sub forma unor cristale fine active (apte de reactivare), trece în stare de cristale mari (fenomenul de recristalizare) de sulfat de plumb «neactiv», care obturează porii și împiedică reactivarea straturilor mai adânci ale plăcii.

Sulfatarea este produsă de:

- păstrarea acumulatorului în starea descărcată;
- încărcări sistematice necomplete;
- folosirea unui electrolit prea concentrat;
- păstrarea la temperaturi prea ridicate;
- prezența unor impurități.

În general, desulfatarea se obține prin încărcări repetate ale acumulatorului cu intensități mici de curent, electrolitul fiind foarte diluat (acesta poate fi chiar numai apă distilată).

Alte metode de desulfatare sînt: îndepărtarea mecanică (frecarea cu peria) a cristalelor mari de sulfat, sau încălzirea acumulatorului cu densități mici de curent, electrolitul fiind o soluție de sodă caustică, sulfat de sodiu, magneziu, sau aluminiu. După desulfatare, acumulatorul trebuie bine spălat cu apă distilată. Pentru a evita sulfatarea, acumulatorul, chiar în stare de repaus, trebuie menținut în permanență încărcat.

63. Construcția electrozilor acumulatorilor cu plăci de plumb. Plăcile acumulatorilor de plumb pot fi grupate în două tipuri de construcție, fundamentale: 1) plăci de mare suprafață, care se împart în: a) plăci normale și b) plăci cu benzi și 2) plăci pastate, care se împart în: a) plăci cu grătar; b) plăci sac; c) plăci tubulare; d) plăci cu pulbere presată.

a) Plăcile de mare suprafață. Electrozii netezi de plumb, cufundați într-o soluție de acid sulfuric și alimentați de la o sursă de curent continuu se «formează»

¹⁾ V. tabelele 31 și 39.

prin încărcări și descărcări repetate, adică stratul de la suprafața lor se transformă în masă activă: pe placa pozitivă, apare peroxidul de plumb PbO_2 , iar pe placa negativă — plumbul spongios. Deoarece capacitatea acumulatorului depinde de cantitatea de masă activă iar grosimea stratului format este foarte mică ($<100\mu$) suprafața de contact a electrozilor cu electrolitul trebuie să fie cât mai mare. De aceea în locul plăcilor de plumb netede sînt întrebunțate plăci cu multe nervuri (aripioare).

Plăcile de mare suprafață normale sînt turnate din plumb topit sub formă de plăci cu un număr mare de orificii dreptunghiulare, separate între ele prin nervuri verticale sau orizontale. Suprafața totală (activă) a plăcii este egală cu suma suprafețelor nervurilor și a cadrului.

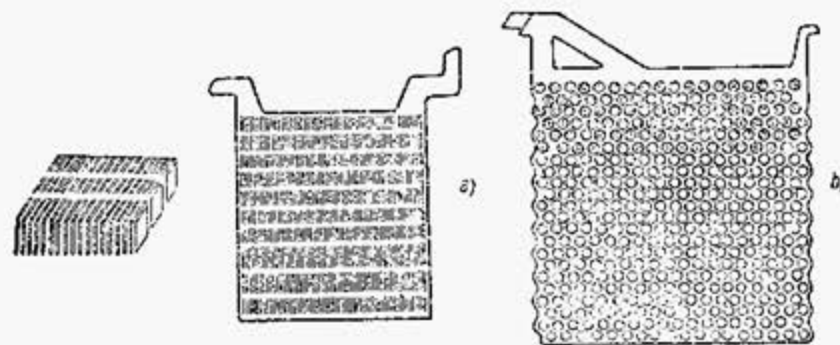


Fig. 38. — Placă de mare suprafață a acumulatorului cu plăci de plumb: a — sub formă de plăci; b — cu orificii și benzi.

Prin micșorarea grosimii nervurilor și prin mărirea numărului lor, se poate practic realiza o suprafață activă de 14—16 ori mai mare decât aceea a unei plăci netede. În mod normal însă, se construiesc azi plăci cu suprafață activă mărită până la de opt ori. O astfel de placă are o grosime de 10—12 mm și aspectul din fig. 38a, cu orificiile verticale înguste. Nervurile verticale subțiri au forma rombică și sînt ținute de nervurile orizontale mai groase care servesc și la distribuirea curentului la nervurile subțiri. Dimensiunile orificiului (fantei) la suprafața plăcii sînt de $7,5 \times 0,7$ mm; spre mijloc (în sensul grosimii), ele scad la $5 \times 0,25$ mm. Cadrul principal al plăcii are o lățime de 2,5 mm.

În partea sa superioară cadrul este îngroșat și are urechi pentru susținerea și suspendarea plăcii.

Plăcile de mare suprafață cu orificii și benzi (tip Manchester). Placa de plumb turnată are un număr mare de orificii rotunde, în care se presează benzi rulate, din plumb foarte pur. Benzile sînt de 7 mm lățime și 0,4 mm grosime și au suprafața ondulată (gofrată). Ele se rulează în formă de spirale. Menținerea lor în orificiile cadrului este asigurată prin forma conică (se îngustează spre centru) a acestor orificii. Suprafața activă este egală cu suprafața totală a benzilor și a cadrului (fig. 38 b).

Caracteristicile plăcilor de mare suprafață: au o capacitate de masă mică (greutate mare și un coeficient mic de utilizare); autodescărcarea este mare; se cere o exploatare foarte atentă (tendința de curbare etc.).

Utilizările plăcilor de mare suprafață. În cea mai mare parte se întrebuințează în acumulatoarele staționare. Se întrebuințează însă și la acumulatoarele de tracțiune. Sînt potrivite acolo unde variațiile intensității de curent în timpul descărcării sînt mari. Prezintă siguranță, soliditate și durată mare de funcționare. Ele constituie de obicei numai electrodul pozitiv, electrodul negativ fiind de tipul sac. Întrebuințarea lor ca placă negativă este dezavantajoasă deoarece plumbul spongios se desface cu timpul de baza sa.

(3) *Plăci pastate.* Acumulatoarele cu plăci de mare suprafață au greutatea mare. De aceea în acumulatoarele transportabile, ca cele de tracțiune, de automobil, de aviație și în multe tipuri navale, care trebuie să aibă o capacitate cît mai mare la un volum și greutate mici, se întrebuințează alte plăci, numite plăci pastate.

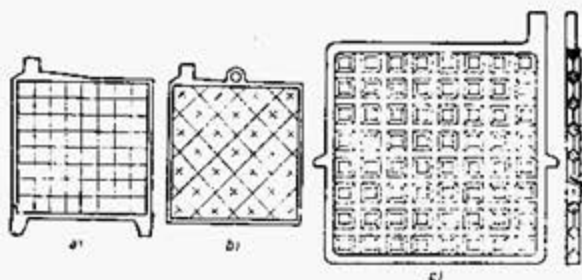


Fig. 39. — Grătarele plăcilor pastate de acumulator cu plăci de plumb.

Placa pastată se compune dintr-un gratar din aliaj de plumb și antimoniu, pe care se aplică (se pastează) o pastă (masa activă) preparată din oxizi de plumb, miniu (Pb_3O_4), litargă (PbO) sau praf de plumb (măcinat în mori speciale și oxidat), amestecați cu acidul sulfuric. Placa pastată se usucă și se supune unor transformări electrochimice (procesul de formare) pentru a se obține la plăcile pozitive peroxid de plumb și la plăcile negative plumb spongios. Plăcile astfel preparate trebuie să aibă o structură poroasă pentru ca în contact cu electrolitul acesta să poată pătrunde în tot volumul lor.

La aceste plăci, suprafața de contact a masei active cu electrolitul (adică suprafața internă a tuturor porilor) este mai mare decît la plăcile de mare suprafață și în consecință capacitatea acumulatorului montat din plăci pastate, la aceeași greutate, este mai mare.

Plăci pastate cu gratar. Pe un cadru-gratar din plumb antimonios, se aplică prin pastare masa activă (pastă) care conține oxizi de plumb (PbO_2 , PbO , Pb_3O_4)¹⁾. Gratarul este constituit dintr-o ramă cu o rețea de nervuri verticale și orizontale (fig. 39).

Gratarul are rolul de a susține pasta și de a conduce curentul; secțiunea și forma sa sînt calculate în acest sens. Întrebuințările sînt foarte numeroase și variate, cu toate că durata lor de funcționare este mai mică decît a plăcilor de mare suprafață. Ele intră în construcția majorității acumulatoarelor transportabile. Diferite sisteme de construcție a acestor plăci permit realizarea unor densități de curent foarte mari.

Plăci sac. Sînt constituite din două grătare împărțite prin nervuri încrucișate, în celule pătrate de 40×40 mm, și acoperite pe o față cu cîte o

¹⁾ Aceste plăci se mai numesc cu gratar și oxizi raportați.

fație perforată de plumb. Pe cealaltă față, la încrucișarea nervurilor, unul din grătare este prevăzută cu nituri, turnate împreună cu rama, iar celălalt are găuri care corespund niturilor din primul gratar (fig. 40).

Cadru și nervurile grătarelor asigură distribuirea curentului la masa activă (pasta), care se presează în celulele lor, iar tabla perforată de plumb asigură menținerea pastei. Accesul electrolitului se face prin orificiile tablei de plumb (900 orificii/m² avînd diametrul de 1,3—2,0 mm). Asamblarea celor două rame, se realizează prin nituri la prese. Plăcile sac se întrebuințează exclusiv ca plăci negative în combinație cu plăcile



Fig. 40. — Placă sac de acumulator cu plăci de plumb.

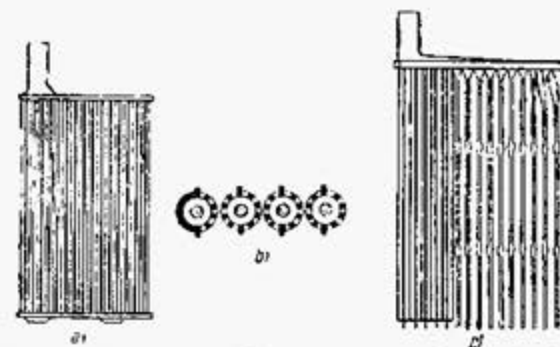


Fig. 41. — Placă tubulară de acumulator cu plăci de plumb: a — vedere exterioră; b — secțiuni prin tuburi; c — nervurile verticale din plumb pentru colectarea curentului.

pozitive de mare suprafață (rareori cu plăci tubulare). Ele se utilizează în acumulatoare staționare, de tracțiune și altele. Au o rezistență mecanică mare, o mare durată de funcționare și o capacitate de masă relativ mare, cîntărind numai 40—45%, din greutatea plăcilor staționare de aceeași capacitate.

Plăci tubulare. Aceste plăci (fig. 41 a,b,c) se compun dintr-un cadru de plumb antimonios avînd două fișii orizontale legate cu un număr mare de nervuri verticale. Fiecare nervură este înmbrăcată într-un tubușor (teacă) de ebonită, avînd pereții perforați (din 0,2 în 0,2 mm) cu orificii orizontale înguste. Înăuntrul tubușoarelor de ebonită se presează în jurul nervurilor cadruului masa activă formată din oxizi în stare de pulberi, electrolitul avînd acces prin orificii.

Plăcile tubulare au o întrebuințare din ce în ce mai mare în cazurile cînd este nevoie de o rezistență mecanică mare (electrocare, iluminatul vagoanelor etc.). Ele sînt folosite ca electrozi pozitivi în combinație cu electrozi negativi din plăci pastate sau sac, și cîntăresc numai 50—60% din greutatea plăcilor staționare de aceeași capacitate.

Plăci cu gratar și pulbere presată. Masa activă se presează (în grătare) sub formă de pulbere puțin umezită și nu sub formă de pastă în prealabil frămîntată ca la celelalte tipuri de plăci cu gratar. Ea are din această cauză o porozitate mai mare. Gratarul acestor plăci

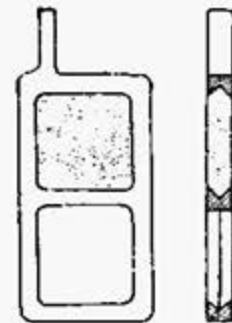


Fig. 42. — Placă cu pulbere (masă) presată de acumulator cu plăci de plumb.

are puține (una sau două) celule, însă mai mari (90–130 mm) decât la celelalte tipuri, o grosime de 4–8 mm și un profil special pentru a reține masa de pulbere (fig. 42).

Construcția aceasta, în care sînt puține nervuri, sau nervurile lipsesc complet, se folosește la regimuri de descărcare slabe și anume în telecomunicații. Ea prezintă

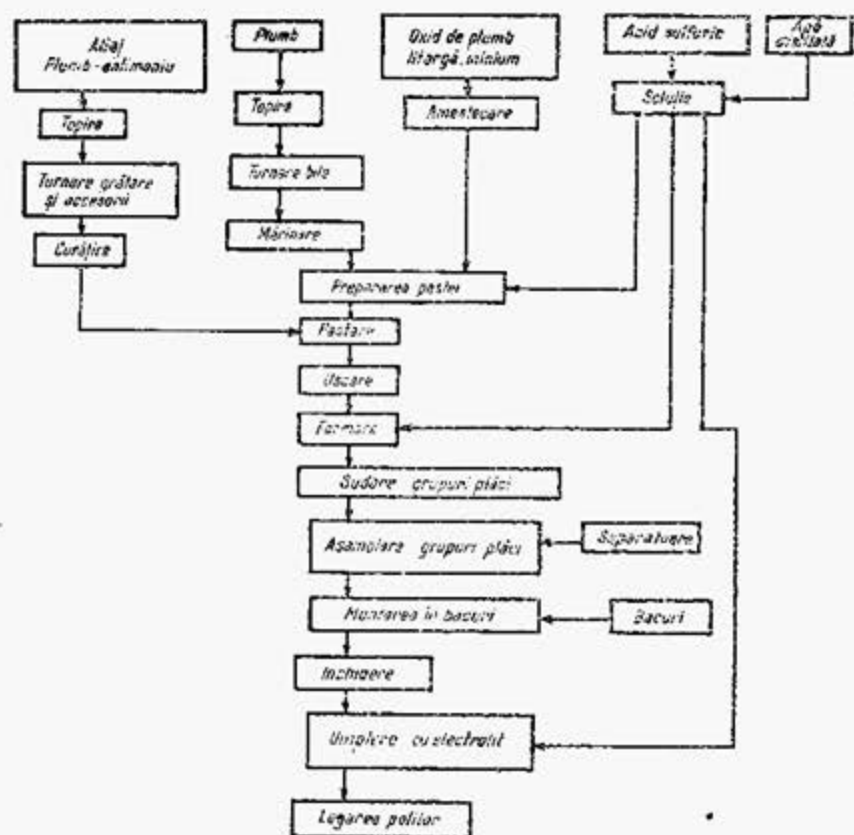


Fig. 43. — Schema de fabricație a acumulatorilor cu plăci pastate.

avantajul unei autodescărări mici (cuplul de acțiune locală între grătar și masa activă fiind redus) și a unei capacități specifice mari.

64. Fabricarea acumulatorilor de plumb cu plăci pastate (fig. 43). Aliajul de plumb-antimoniu se topește în cazane și se toarnă în forme, obținându-se grătore. Această operație este toxică din cauza degajării vaporilor de plumb.

Operația următoare de fabricare este aceea de producere a pastei. Pasta se prepară fie din praf de plumb — suboxid de plumb —, rezultat din măcinarea bilelor de plumb în mori, fie din diferiți oxizi de plumb, în special litargă și miniu (tabela 18). Acești oxizi se amestecă în malaxoare cu soluție de acid sulfuric (paste acide) sau de amoniac (paste amoniacale). Plăcile cu pulbere presată și cele

tubulare (v. § 63 β și γ) nu au pastă, ci o pulbere de oxid de plumb care se umezește cu acid sulfuric diluat.

Tabela 18. Exemple de compoziție a pastelor de acumulatori cu plăci de plumb

Pasta	Plăcile pozitive	Plăcile negative
Acidă	3 părți litargă, 3 părți miniu, 1 parte soluție 10% H_2SO_4	300–400 părți litargă, 0–100 părți miniu, 1 parte negru de fum, 64–72 părți soluție 13% H_2SO_4
Amoniacală	20 părți miniu, 1 parte sulfat de amoniu, 3–4 părți apă	100 părți miniu, 5 părți sulfat de amoniu, 1–2 părți sulfat de bariu, 15–20 părți apă
Pulbere de plumb umedă	10 părți praf de plumb, 2 părți soluție 50% H_2SO_4	50 părți praf de plumb, 1 parte sulfat de bariu, soluție de 20% H_2SO_4 (după nevoie)

Imediat după producerea pastei urmează operația de pastare. Aceasta constă în umplerea grătorelor cu pastă sau cu praf de plumb, operație care trebuie legată de măsuri de protecție a muncii foarte severe din cauza toxicității mari a oxizilor de plumb. În cazul producției în serii mari se recomandă ca pastarea să se facă cu mașini automate, care dau o producție uniformă și de calitate bună și micșorează pericolul de intoxicație.

După pastare, plăcile trec la uscare și cimentare (operație asemănătoare cu priza cimentului), fie în aer liber la temperatura camerei de lucru, fie în uscătorii. Plăcile uscate și cimentate sînt apoi supuse unei electrolize (încărcări) în soluție de acid sulfuric, cu scopul de a transforma oxizii și sulfatul de plumb din pastă în plumb spongios la plăcile negative și în bioxid de plumb la plăcile pozitive. După electroliză, care în fabricație poartă numele de operație de formare, plăcile pozitive și negative încep să se deosebească între ele din punctul de vedere al compoziției masei lor. Placa pozitivă este oxidată în peroxid de plumb (roșu-cărămiziu), iar placa negativă este redusă în plumb spongios (cenușiu). Plăcile formate, de aceeași polaritate se leagă în paralel prin sudare la barete de plumb constituind astfel grupuri de plăci care apoi se montează împreună (v. § 63 β). Separatoarele de lemn, ebonită, sau decelit (polietilenă de vinil) se montează între plăci de polaritate inversă. Grupurile de plăci asamblate cu separatoare se așază în bacuri de sticlă, ebonită, sau lemn și acumulatorii astfel montați se închid cu capace și se etanșează cu smoală (la acumulatorii transportabili) sau se acoperă cu plăci de sticlă (la acumulatorii staționare).

65. Fabricarea acumulatorilor staționare cu plăci de plumb (fig. 44). Plăcile de mare suprafață au fabricație diferită de cea a plăcilor pastate. Prima operație este aceea de turnare a plăcilor din plumb topit în cazane. Aceste plăci sînt mult mai groase decât cele pastate și nu impun aplicarea materialului activ. După turnare, plăcile trec la curățire și apoi la formare, prin electroliza într-o soluție de acid sulfuric. Ele se leagă întâi la polul pozitiv al sursei și plumbul din ele trece în peroxid de plumb; în acest mod se obțin plăcile pozitive; apoi se pun din nou la electroliză, legându-le la polul negativ al sursei. De data aceasta peroxidul de plumb este redus în plumb spongios și astfel se obțin plăcile negative. Pentru a se obține stratul necesar de masă activă, plăcile de plumb sînt supuse mai multor

electrolize, fiind legate cînd la polul pozitiv, cînd la polul negativ. În acest mod plumbul suferă mai multe oxidări și reduceri care duc la obținerea unui strat mai gros de materie activă.

Procedeeul modern al formării plăcilor în acid sulfuric constă în folosirea soluției electrolitice cu adausuri de acid cloric și percloric (cum și de sărurile respective) care formează cu plumbul săruri solubile. În acest mod formarea stratului

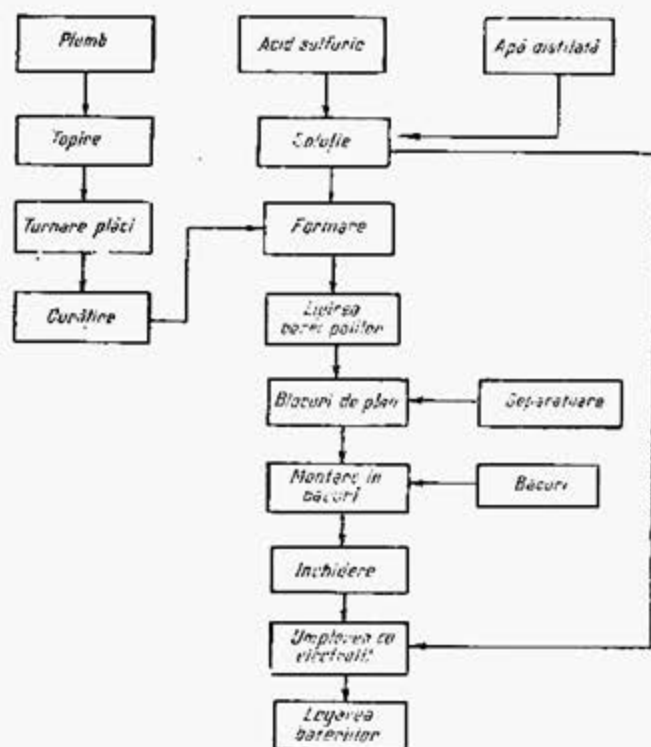


Fig. 44. — Schema de fabricație a acumulatorilor cu plăci de mare suprafață.

activ nu necesită încărcări și descărcări repetate. Se mai folosesc în acest scop acizii și sărurile de crom și mangan cum și acizii sulfuros, azotic, acetic, fosforic etc.

66. Separatoarele acumulatorilor de plumb servesc la izolarea plăcilor de polaritate diferită. În acumulatorii staționare ele se prezintă sub forma tuburilor de ebonită sau de sticlă. În acumulatorii transportabili, separatoarele sînt foițe din lemn, din materiale plastice perforate sau poroase (ebonită, clorură de polivinil), sau din vată de sticlă.

α) Separatoarele de lemn. Lemnul cel mai indicat este o anumită specie de cedru, dar se întrebunțează deseori și teiul, aninul, sau fagul. Separatoarele de lemn se întrebunțează, fie singure, fie în combinație cu un separator din material plastic. În primul caz, separatorul are o grosime de circa 2 mm și este prevăzut cu canale longitudinale pe una din fețe; la montaj fața cu canale este îndreptată

spre placa pozitivă, permițînd astfel accesul mai ușor al electrolitului. În al doilea caz, foițele de lemn au o grosime de 0,2—0,4 mm și sînt netede pe ambele fețe.

Înainte de întrebunțare în acumulatori, separatoarele de lemn se supun unui tratament chimic, care are ca scop eliminarea materiilor organice vătămătoare.

β) Separatoarele din materiale plastice sînt constituite fie din plăci poroase, fie din foi subțiri perforate și ondulate: volumul porilor poate atinge 70% din volumul separatorului în cazul plăcilor poroase, iar în cazul separatorilor subțiri suprafața de perforare este de 18—40% din suprafața totală a separatorului.

Materialul plastic poate fi ebonita, cauciucul cu micropori, sau clorura de polivinil (decelit). Condiția esențială este o totală neutralitate față de acidul sulfuric și temperatura de înmuiere superioară temperaturii maxime de funcționare a acumulatorului.

67. Electrolitul acumulatorilor cu plăci de plumb. Se întrebunțează ca electrolit soluția apoasă de 27—39% H_2SO_4 . (tabela 19). Acidul trebuie să fie foarte pur, conform STAS 161-49. Pentru diluare (v. § 88) se întrebunțează apa simplă distilată în alambicuri normale, sau (mai bine) prin dializă.

Tabela 19. Conținutul în acid sulfuric al soluțiilor de electrolit ale acumulatorilor cu plăci de plumb

Densitatea	Conținutul în H_2SO_4		Densitatea	Conținutul în H_2SO_4		Densitatea	Conținutul în H_2SO_4	
	g/l	%		g/l	%		g/l	%
1,050	77	7,34	1,310	529	40,30	1,520	936	61,57
1,100	158	14,36	1,320	548	41,51	1,540	977	63,44
1,150	239	20,08	1,330	567	42,63	1,560	1 017	65,18
1,180	292	25,25	1,350	605	44,82	1,600	1 099	68,69
1,200	328	27,30	1,360	624	45,88	1,640	1 182	72,07
1,210	348	28,69	1,370	643	46,93	1,700	1 312	77,19
1,220	364	29,83	1,380	662	48,00	1,720	1 381	79,52
1,230	382	31,05	1,390	682	49,06	1,760	1 456	82,72
1,240	400	32,26	1,400	702	50,14	1,800	1 564	86,90
1,250	418	33,44	1,420	740	52,11	1,810	1 596	88,27
1,260	435	34,50	1,440	779	54,11	1,820	1 638	90,05
1,270	454	35,75	1,460	817	56,95	1,830	1 685	92,07
1,280	472	36,90	1,470	837	58,93	1,835	1 717	93,81
1,290	490	37,90	1,480	856	59,83	1,840	1 759	95,60
1,300	510	39,23	1,500	896	59,69	1,841	1 808	98,20

Temperatura de îngheț a electrolitului are un rol important; ea depinde de concentrația soluției.

Electrolitul imobilizat. Se întrebunțează ca electrolit soluția de acid sulfuric, cu viscozitatea mărită prin adausul de silicat de sodiu (sticlă solubilă) și anume 10—25 ml sticlă solubilă la 100 ml soluție 40% H_2SO_4 . Umplerea acumulatorului cu electrolit nu se face decît două ore după prepararea acestuia, iar încărcarea se poate începe numai 24 ore după umplere.

68. Plumbul, antimonul și oxizii de plumb întrebunțări în acumulatori trebuie să fie de mare puritate. Plumbul trebuie să corespundă prescripțiilor STAS 663-49: calitatea Pb Ac 1 sau Pb Ac 2. Antimonul va fi conform STAS 446-49 și 52, art. 10.

69. Vasele de acumulatori. Vasele de sticlă trebuie să fie conform STAS 445-49 și 52, art. 17; monoblocurile și cutiile de ebonită, conform STAS 444-49 și 52, art. 11, și STAS 446-49 și 52, art. 8.

70. **Încărcarea acumulatorilor** se poate face cu ajutorul generatoarelor de curent continuu, al redresoarelor uscate (cuproxid sau seleniu) și al redresoarelor cu tuburi electronice. O parte din aparatul de comandă și protecție este construit special pentru aceste întrebuințări (întreruptoare de curent nul și invers, comutatoare de elemente etc.). De asemenea, instrumentele de măsurat sînt adeseori speciale, același instrument (ampermetru și voltmetru) permițînd urmărirea atât a descărcării, cît și a încărcării (scara cu zero la mijloc).

Sînt folosite patru metode de încărcare: α) cu tensiunea constantă, β) cu intensitatea de curent constantă, γ) cu variația curentului de încărcare în trepte.

α) **Încărcarea cu tensiunea constantă** este întrebuințată rar, și anume cînd sursa de curent are tensiunea apropiată de cea necesară încărcării elementului sau a bateriei. Intensitatea curentului de încărcare scade pe măsura încărcării acumulatorului, deoarece conform relației:

$$I = \frac{U_i - E}{r_a},$$

atît E cît și r_a cresc, iar $U_i = \text{const}$, astfel încît încărcarea pînă la completa capacitate durează mult. De obicei se alege o sursă cu o tensiune de $U_i = 2,25 \dots 2,35$ V de element. Un acumulator descărcat pînă la 1,8 V, pus la încărcare sub o tensiune de 2,3 V, primește în prima oră 50% din capacitatea sa, în a doua oră 22%, în a treia oră 14% etc.

Metoda este indicată în cazurile cînd acumulatorul trebuie repus repede în serviciu, fără a fi încărcat complet.

β) **Încărcarea cu intensitate de curent constantă.** Această metodă are și ea o întrebuințare limitată, deoarece comportă pierderi de energie pentru procese secundare, după ce acumulatorul a primit 50–60% din capacitatea nominală. Pentru menținerea intensității constante (în cazul cînd nu se poate varia tensiunea la bornele sursei), se întrebuințează un reostat (care consumă energie), a cărui rezistență maximă este:

$$R = \frac{U - 2n}{I},$$

în care: U este tensiunea sursei exterioare;

n — numărul elementelor de acumulator.

Această metodă se întrebuințează la bateriile mici și mai ales cînd tensiunea sursei este impusă prin condiții locale.

γ) **Încărcarea în trepte.** Încărcarea se face în două sau mai multe trepte. În general intensitatea de curent a primei trepte este de două ori mai mare decît a celei de a doua trepte etc. Această metodă se întrebuințează la prima încărcare a acumulatorului și trebuie repetată la anumite intervale în timpul funcționării, chiar cînd se folosește în mod normal una din primele două metode. Tensiunea la barele de încărcare se menține între 2,45 și 2,90 V de element. În serie cu bateria de acumulatori se montează o rezistență calculată pentru intensitatea maximă de curent. Fig. 45 arată variația tensiunii și a intensității de curent după această metodă. Se poate vedea că încărcarea este condusă în trei trepte de curent constant pe fiecare din ele. Intensitatea de curent la prima treaptă se menține pînă cînd tensiunea la borne ajunge pînă la 2,35–2,40 V de element. La a doua treaptă de încărcare, intensitatea curentului se reduce la jumătate și durează pînă la tensiunea de 2,50 V de element. Apoi intensitatea de curent este redusă la un sfert (a treia treaptă), regim care se menține pînă la sfîrșitul încărcării.

71. **Procedeele de încărcare a bateriilor de acumulatori.** Bateriile de acumulatori se încarcă periodic prin încărcări normale și încărcări de egalizare. Prin încărcarea de egalizare se înțelege încărcarea mai prelungită decît cea normală, care se execută la anumite intervale de timp (o dată sau de două ori pe an la bateriile staționare și la fiecare trei luni la bateriile transportabile) și care are ca scop să aducă toate plăcile fiecărui element de acumulator în aceeași stare de încărcare

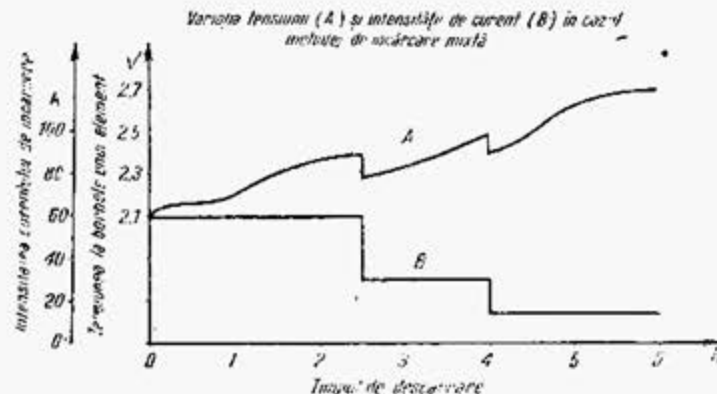


Fig. 45. — Variația tensiunii (curba A) și a intensității curentului (curba B) la metoda de încărcare în trepte.

completă. Acest lucru este necesar mai ales pentru o bună întreținere a plăcilor negative, a căror descărcare este mai mare în timpul funcționării acumulatorului (se înfățișează astfel pericolul sulfatării anormale).

α) **Încărcarea bateriilor staționare,** care servesc azi mai ales pentru alimentarea rețelilor, destul de importante, de curent continuu ale centralelor telefonice și electrice (diferite relee, aparatele de comandă și protecție, mecanismele de anclanșare a comenzilor electrice ale întreruptoarelor de mare putere de rupere, motoarele și iluminatul electric de siguranță, de avarie, ale centralei) se face azi în genere după două procedee: a) procedeul de încărcare-descărcare și b) de încărcare permanentă.

a) **Metoda de încărcare-descărcare.** Bateria se găsește periodic o parte a timpului în stare de descărcare și o parte în stare de încărcare (de obicei un ciclu de descărcare-încărcare se repetă la fiecare 24 sau 48 de ore). În timpul încărcării bateriei, sarcina cerută de rețeaua deservită de bateria de acumulatori este suportată de grupul de încărcare a bateriei. O altă baterie, de rezervă, menținută încărcată, asigură sarcina de avarie. În acest caz grupul de încărcare se pune în funcțiune pentru încărcarea corespunzătoare și se deconectează imediat ce bateria este încărcată.

La trecerea acumulatorilor din starea de descărcare în starea de încărcare și invers, în special în cazul curentilor mari de încărcare, tensiunea la bornele bateriei variază în limite largi. Pentru asigurarea unei tensiuni constante a rețelei sînt în genere utilizate comutatoarele de baterie, cu ajutorul cărora se schimbă numărul elementelor conectate la barele colectoare în funcție de tensiunea acestora. La descărcarea bateriei, numărul de elemente conectate la barele colectoare se mărește; la încărcare, se micșorează.

Numărul acumulatorilor conectați la comutator se determină cu următoarea expresie:

$$n = \frac{U}{U_{\min} - U_{\max}}$$

În care: U este tensiunea normală a barelor colectoare;

$U_{\min}$ — tensiunea minimă a elementului de acumulator admisă la descărcare;

$U_{\max}$ — tensiunea maximă a elementului de acumulator la încărcare.

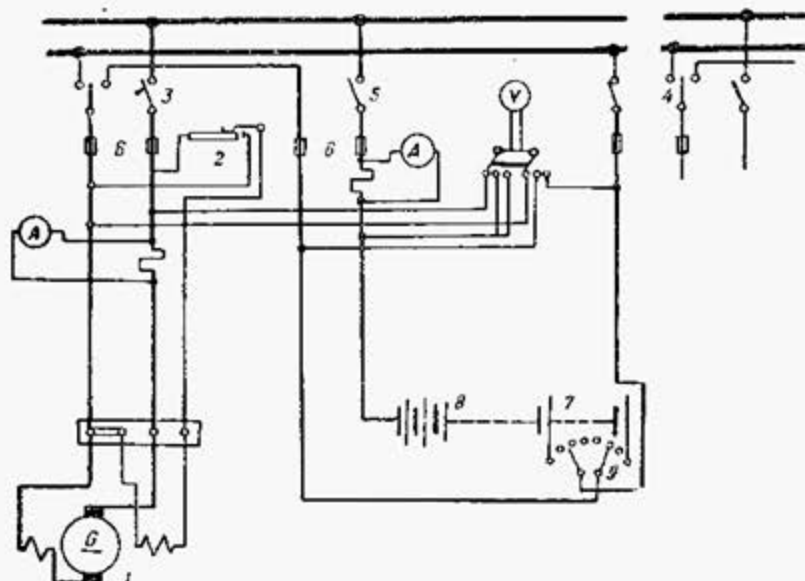


Fig. 46. — Schema instalației de încărcare a unei baterii de acumulatori:
1 — generator de curent continuu; 2 — reostatul de excitație al generatorului;
3 — întreruptor automat pentru curent invers; 4 — comutator unipolar;
5 — întreruptor unipolar; 6 — siguranță fuzibilă; 7 — elemente auxiliare;
8 — baterie de acumulatori; 9 — comutator dublu pentru comanda elementelor auxiliare.

Considerând, de exemplu, tensiunea normală a barelor colectoare de 110 V, tensiunea minimă a elementului de 1,83 V, iar tensiunea maximă de 2,75 V, numărul elementelor de acumulatori conectați la comutator va fi:

$$\frac{110}{1,83} - \frac{110}{2,75} \approx 20$$

ceea ce reprezintă aproximativ o treime din numărul total al elementelor. La un reglaj al tensiunii din 2 în 2 V, comutatorul va trebui să aibă 21 de contacte. La tensiunea barelor colectoare de 220 V se leagă câte două elemente între două contacte ale comutatorului (reglaj din 4 în 4 V).

Pentru a permite ca bateria să rămână legată la rețeaua de utilizare și în timpul încărcării, se folosesc comutatoare cu două pârghii (două perii) și montajele indicate în fig. 16 pentru cureni mici și fig. 47 și 48 pentru cureni mari.

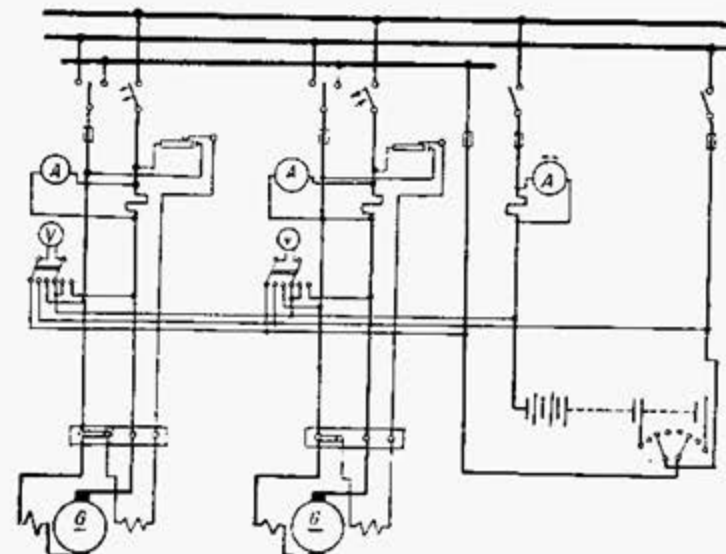


Fig. 47. — Schema instalației de încărcare a unei baterii de acumulatori de mare capacitate de la două generatoare în paralel.

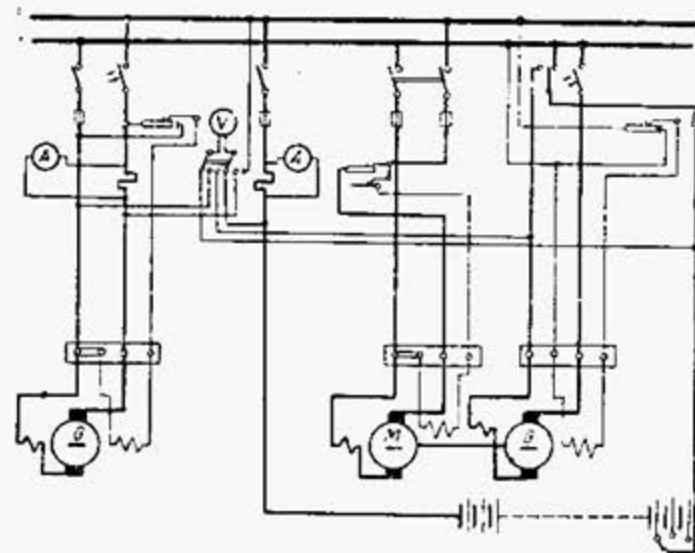


Fig. 48. — Schema instalației unui generator de curent continuu cu baterie pile acumulatori. Încărcarea bateriei se face de la generatorul (stînga) în serie cu survoltorul (dreapta) antrenat de un motor de curent continuu.

După cum se vede din aceste scheme, bateria se conectează la barele colectoare prin peria de descărcare a comutatorului. O altă perie de încărcare, se folosește pentru conectarea la baterie a generatorului de încărcare. Acesta poate fi conectat cu ajutorul unui comutator fie la baterie, fie la barele colectoare. Protecția circuitelor se realizează cu ajutorul siguranțelor fuzibile, în afară de circuitul generatorului, care este protejat printr-un întrerupător automat cu relee de curent maximal și invers. Acesta protejează generatorul contra suprasarcinii și contra funcționării anormale, ca motor alimentat de la baterie, în cazul întreruperii grupului de curent alternativ.

b) *Metoda de încărcare (de completare) permanentă.* Această metodă diferă de metoda încărcare-descărcare prin faptul că bateria este menținută continuu în stare de încărcare pentru a compensa descărcarea acumulatorilor și se face prin aplicarea unei tensiuni de încărcare constante la bornele bateriei. În timpul când bateria nu debitează în rețeaua de utilizare, curentul de încărcare compensează auto-descărcarea bateriei, care depinde de dimensiunile acumulatorului, de greutatea specifică a electrolitului, de temperatura și de gradul de uzură a acumulatorului. Tensiunea de încărcare variază de obicei între 2,1 și 2,2 V. În procesul utilizării bateriei de acumulare, tensiunea de încărcare permanentă trebuie corectată. Când curentul de încărcare permanentă este insuficient, acumulatorul se descarcă treptat și apare necesară o încărcare de egalizare. Procedul de încărcare permanentă folosind un montaj cu comutatoare de baterie, asigură funcționarea satisfăcătoare pentru receptoarele folosind curenți nu prea intensi. În cazul alimentării rețelei care deservește comenzile întreruptoarelor mari ale centralelor electrice, necesitând curenți foarte intensi, funcționarea acestora provoacă o scădere bruscă a tensiunii. Deoarece tensiunea barelor colectoare este cu puțin mai ridicată decât tensiunea de funcționare a comenzilor, surplusul de tensiune de care se dispune este mic. Pentru a se asigura la comenzi o tensiune necesară, trebuie să se aleagă

acumulatori cu capacitatea suficient de mare, astfel ca datorită rezervei mari de energie tensiunea să nu scadă prea mult. Acesta este cazul utilizării bateriilor de acumulare care alimentează receptoare necesitând curenți intensi de scurtă durată.

Metoda de încărcare permanentă când bateria este montată cu comutatoare de baterie, necesită prezența unui număr important de elemente de acumulator auxiliare care însă nu se încarcă permanent și sunt supuse astfel sulfatării și altor neajunsuri importante. De aceea în ultimul timp se observă tendința de a se folosi montaje perfecționate fără comutatoare și fără acumulatori auxiliare.

2) *Încărcarea bateriilor transportabile.* Încărcarea bateriilor transportabile (cu un număr fix de elemente de acumulatori) cum sunt cele pentru tracțiunea electrică cu acumulatori, pentru iluminatul trenurilor, pentru aparate

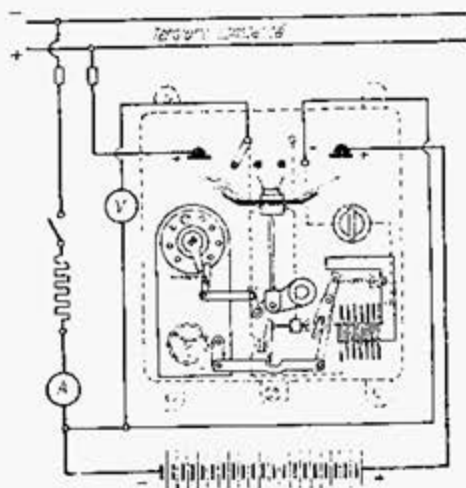


Fig. 49. — Schema unui întrerupător automat pentru încărcarea bateriilor de acumulare.

transportabile de telecomunicații, de laborator etc., se face cu surse de încărcare cu tensiune constantă. Pentru limitarea curentului de încărcare se folosesc rezistențe

fixe sau reglabile. În aceste montaje se folosesc deseori întrerupătoare automate de încărcare de genul celui arătat în fig. 49 (sistem Pöhler). Acest întrerupător constă dintr-un mecanism de declanșare-ancanșare comandat de un relee la care este atașat un mecanism de ceasornic. Releul este reglat astfel ca să introducă întrerupătorul în circuitul de încărcare a bateriei când tensiunea unui element ajunge la 2,2–2,4 V (începerea degajării gazelor). În acest moment începe să funcționeze și ceasornicul care comandă întreruperea încărcării după un timp fixat (care depinde de tipul acumulatorului și se determină astfel ca să nu se ajungă la supraîncălzirea acumulatorului).

72. *Punerea în funcțiune a bateriei.* Umplerea cu electrolit de densitatea prescrisă se face de fabrica producătoare. Încărcarea începe la una până la șase ore după umplere. Polul pozitiv (PbO_2) al bateriei se leagă la polul pozitiv al sursei de încărcare iar polul negativ (Pb) la polul negativ al sursei de încărcare.

Prima încărcare se face totdeauna după metoda în trepte. În tot timpul încărcării se controlează greutatea specifică a electrolitului, care la umplere la acumulatori transportabile este de 1,12–1,18 g/cm³, iar la sfârșitul încărcării trebuie să fie de circa 1,285 g/cm³ (vara 1,250–1,265 g/cm³). Prima încărcare durează circa 40–48 ore, în afară de întreruperile pentru răcire. Intensitatea maximă a curentului de încărcare este indicată de fabrica producătoare.

Punerea în funcțiune a bateriilor staționare se face după instrucțiunile speciale ale fabricii producătoare.

73. *Reguli generale pentru întreținerea acumulatorilor cu plăci de plumb.* Acidul trebuie să corespundă normelor STAS. Prepararea soluției de densitatea prescrisă se face numai în vase de plumb, de ceramică sau de sticlă și în nici un caz în vase de fier. Diluarea se face turnând acid în apă distilată, în nici un caz apă distilată în acid (88.1).

Umplerea se face cu acid având o temperatură de maximum 30°C, iar electrolitul trebuie să acopere plăcile cu 15 mm peste marginile de sus.

Intensitatea de curent maximă admisă la încărcare este arătată în instrucțiunile fabricii producătoare. Se va prefera metoda de încărcare în 2–3 trepte, prima treaptă terminându-se la tensiunea de 2,30–2,35 V de element (degajarea gazelor).

Se va observa legarea corectă a bateriei la rețeaua de încărcare.

Nu se vor admite subîncălzări și supraîncălzări (dese).

Nu se vor admite descărcări sub tensiunea finală prescrisă în instrucțiuni.

Încărcarea se va face în locuri ventilate.

Se vor observa indicațiile cuprinse în standardele în vigoare.

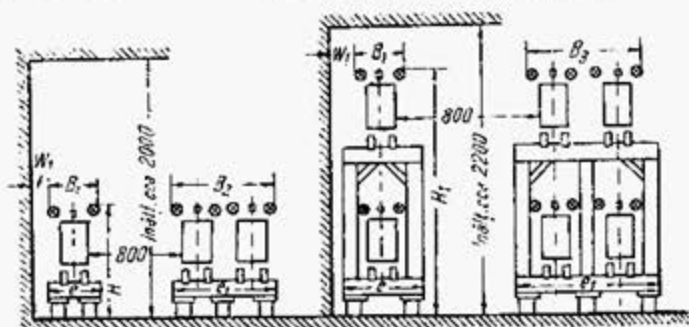
74. *Standarde de Stat în vigoare.* Principalele tipuri de acumulatori care se fabrică în prezent în R.P.R. și caracteristicile acestora sunt indicate în STAS 443-52, 444-52, 445-52, 446-52.

75. *Instrucțiuni generale pentru instalații staționare de baterii de acumulatori cu plăci de plumb.* Spațiul rezervat bateriei de acumulatori trebuie să fie uscat, bine ventilat, ferit de trepidații și de praf. Sunt interzise variațiile mari ale temperaturii ambiante (în încăperea). Înălțimea încăperii, în cazul așezării bateriei pe un singur etaj (rînd vertical), va fi de minimum 2 m. Ea va crește cu numărul etajelor bateriei (de obicei două etaje). Încăperea va avea pereții (și plafonul) căptușiți cu plăci antiacide sau tencuiți cu mortar antiacid (plăci cu glazura antiacidă, mortar cu ciment antiacid etc.). Podelele vor fi acoperite cu un strat antiacid (mortar de ciment metalurgic etc.). La tensiuni de peste 250 V față de pământ, bateria va avea împrejur un drum de servire acoperit cu materiale electrolizante.

Ferestrele și ușile vor fi vopsite cu vopsele antiacide și vor fi astfel îndreptate, încît aerul cu vaporii acizilor care se evacuează să nu producă noxe în încăperile

Tabela 20. Dimensiunile necesare unei baterii de acumulatori așezată într-un singur rând orizontal (R); două rânduri orizontale (DR); într-un rând și două etaje (E); în două rânduri și două etaje (DE)

Capacitatea în Ah la o descărcare în timp de trei ore	Lungimea	Lățimea				Lățimea maximă a stelajului			
		B_1	B_2	B_3	W_1	R	E	DR	DE
					E				
12	85	181	381	416	67 97	205	325	375	590
24	120	181	381	416	67 97	205	325	375	590
36	155	181	381	416	67 97	205	325	375	590
48	195	181	381	416	67 97	205	325	375	590
27	105	279	591	679	25,5 125,5	280	480	595	880
54	140	279	591	679	25,5 125,5	280	480	595	880
81	175	279	591	679	25,5 125,5	280	480	595	880
108	280	200	450	535	57,5 137,5	265	425	515	760
135	280	240	530	615	57,5 137,5	305	465	585	840
162	280	280	610	695	57,5 137,5	345	505	675	920
216	280	200	450	—	50	250	—	500	—
270	280	240	530	—	50	290	—	580	—
324	280	280	610	—	50	330	—	660	—
378	280	315	618	—	50	365	—	730	—



Spațiul necesar amplasării bateriilor staționare (tabela 20).

vecine sau în clădirile alăturate. Se va face un calcul de evacuare a aerului viciat (se va avea în vedere mai ales durata de încărcare a bateriei). În cazul când ventilația naturală nu este suficientă, se va amenaja o instalație de ventilație, cu ventilatoarele așezate în afara încăperii bateriei de acumulatori, ventilatorul lucrând ca un ventilator de presiune.

Încăperea bateriei de acumulatori trebuie să fie protejată împotriva faghețului. Încălzirea nu trebuie să fie cu foc deschis, deoarece în încăperea se produc gaze explozive. În acest sens, alături de instalația de iluminat cit și întregul aparat de întrerupere și conectare a curentului, trebuie protejate împotriva exploziei.

Conductorii elementelor de acumulatori din sala bateriei vor fi executate din cupru sau aluminiu, neizolate (blanc), dar acoperite cu unsoare sau cu vopsea antiacidă și montate pe izolatoare de sticlă sau ceramice, cu glazură antiacidă. Însemnarea polarității se face utilizând culoarea albastră pentru polul și conductorul negativ, și culoarea roșie pentru polul și conductorul pozitiv.

În tabela 20 și fig. anexată sunt cuprinse datele asupra spațiilor necesare instalării unor baterii de acumulatori cu plăci de plumb.

76. **Protecția muncii în fabricile de acumulatori cu plăci de plumb.**
a) **Factorii nocivi în fabricație.** Fabricarea acumulatorilor cu plăci de plumb este o fabricație nocivă. Cauza principală a acestei nocivități constă în toxicitatea oxizilor, vaporilor și prafului de plumb întrebuințați pe scară mare în această industrie.

Alți factori toxici sînt acidul sulfuric și masticul de bitum.

Intoxicația cu plumb, caracteristică condițiilor de lucru în fabricile de acumulatori, este o intoxicație progresivă și cronică. S-a stabilit că pentru o intoxicație gravă cu plumb este nevoie de o doză toxică de 20–25 g. În mod normal în atelierele nocive ale fabricii de acumulatori (turnătorie, moara de plumb, pastaj, montaj) cantitatea maximă absorbită de om prin diverse căi (respiratorii, piele) este de 1–2 mg/zi. Totuși, în condițiile de lucru neprotejate, în unele ateliere ca: atelier de producere a prafului de plumb, atelier de prepararea pastei și de pastare, conținutul în aer poate atinge 1 mg/m³; socotind că un om inspiră 0,45 m³/h aer, în șase ore el va absorbi 10,8 mg plumb. În acest sens ca primă măsură de protecție contra intoxicației cu plumb, se limitează în atelierele fabricii de acumulatori conținutul de plumb în aer la 0,01 mg/m³.

Datele statistice împart toxicitatea diverselor ateliere conform tabeli 21.

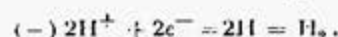
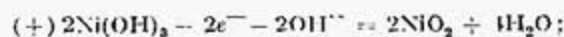
Tabela 21

Atelierul	Procent de intoxicații față de numărul total de lucrători din atelier
Turnarea grătarelor	1,7
Prepararea pastei și umplerea plăcilor tubulare	10,0
Pastaj	19,4
Asamblarea (montaj)	10,7

Prescripțiile pentru protecția muncii trebuie să prevadă atât mijloacele de apărare individuală ale lucrătorului, cât și mijloacele generale de protecție, împiedicând producerea condițiilor toxice în ateliere.

b) **Mijloacele de protecție individuale** constau în mănuși de cauciuc sau de țesătură foarte deasă și măști de protecție pentru gura și nasul lucrătorului. Haine și încălțăminte de lucru diferite de cele de oraș și casă și păstrarea în dulapuri

În afară de reacțiile principale, la ambii electrozi se petrec și următoarele reacții secundare mai importante (în timpul încărcării):



Aceste reacții secundare micșorează randamentul acumulatorilor alcaline. Ecuațiile potențialelor la cei doi electrozi sînt:

$$V_{(+)} = V_{(+)}^0 - \frac{0,058}{2} \lg \frac{1}{[\text{OH}^-]^2}; \quad (79.1)$$

$$V_{(-)} = V_{(-)}^0 - \frac{0,058}{2} \lg \frac{1}{[\text{OH}^-]^2}, \quad (79.2)$$

de unde expresia f.e.m. va fi:

$$E = V_{(+)}^0 - V_{(-)}^0 = E^0. \quad (79.3)$$

80. **F.e.m. a acumulatorilor alcaline.** Ca și în cazul general al surselor electrochimice, valoarea f.e.m. poate fi calculată din valoarea potențialelor celor doi electrozi sau din datele termochimice.

a) **Valoarea potențialelor electrozilor.** Din formulele (79.1) (79.2) și (79.3) se vede că, cu toate că valoarea potențialelor electrozilor depinde de concentrația ionilor OH^- (concentrația electrolitului), valoarea f.e.m. este independentă de această concentrație. Valoarea $V_{(+)}^0$ este definită de echilibrul reacției $\text{Ni}^{++} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}^{+}$, al cărei potențial este de + 0,53 V față de hidrogen (uneori electrodul de referință este zincul, în care caz $V_{(+)}^0 = 1,83$ V (v. § 16).

Valoarea $V_{(-)}^0$ a plăcii de fier (acumulator Fe — Ni) este - 0,88 V față de hidrogen (+ 0,42 V față de zinc); la placa de cadmiu (acumulator Cd — Ni) $V_{(-)}^0 = - 0,83$ V față de hidrogen (și - 0,47 V față de zinc).

Valoarea f.e.m. la Fe — Ni este:

$$E = 0,53 - (- 0,88) = 1,41 \text{ V},$$

iar la Cd — Ni:

$$E = 0,53 - (- 0,83) = 1,36 \text{ V}.$$

F.e.m. a acumulatorilor Fe — Ni este puțin mai mare (celca 0,05 V) decît aceea a acumulatorilor Cd — Ni.

β) **Calculul termochimic al f.e.m.** (v. § 19) are la bază pentru acumulatorile Fe — Ni, reacția:



Coefficientul de temperatură între 0 și 30°C este de 0,000 26 - 0,000 7 V/°C. Conform acestei reacții, la 18°C, f.e.m. $E = 1,58$ V.

81. **Rezistența interioară a acumulatorilor alcaline** este de ordinul $r_a = 0,003 \dots 0,0075 \Omega$, la acumulatori Fe — Ni; ea este puțin mai mică la acumulatorile Cd — Ni.

Relația dintre rezistența și capacitatea acumulatorului poate fi exprimată prin formula empirică:

$$r_a = \frac{0,35 \cdot 0,4}{C_{Ah}} \Omega.$$

Creșterea rezistenței pe măsura descărcării acumulatorului (fig. 51) este explicată de unii prin faptul că $\text{Ni}(\text{OH})_2$ are un volum mai mic decît $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

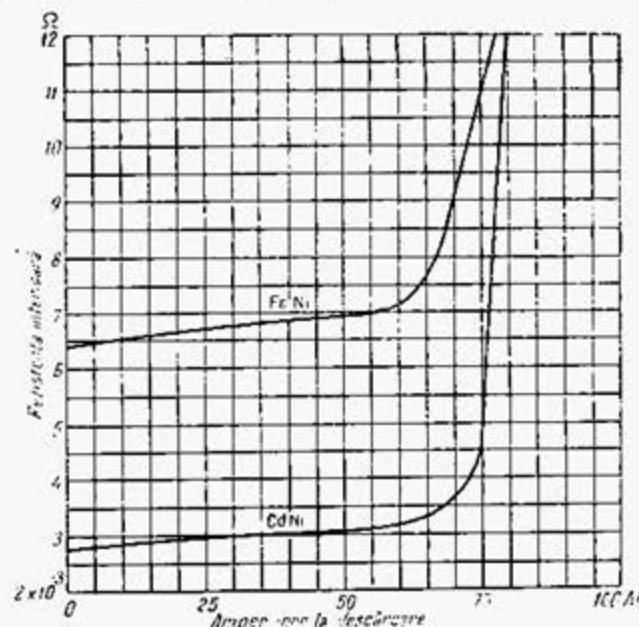


Fig. 51. - Variația rezistenței interioare a acumulatorilor alcalini (Fe-Ni și Cd-Ni) în funcție de starea de descărcare.

și contactul dintre masa activă și părțile conducătoare de curent (tabla nichelată) devine mai slab.

Rezistența interioară mare reprezintă un neajuns însemnat al acumulatorilor alcalini, deoarece limitează intensitatea curentului de descărcare.

82. **Caracteristicile $U=f(I)$ la descărcare și la încărcare.** Acumulatorul Fe — Ni (fig. 52 curbele A). La încărcare, tensiunea crește repede de la 1,41 pînă la 1,60-1,67 V, apoi scade puțin ca urmare a creșterii temperaturii și a variației rezistenței interioare. Urmează o perioadă lungă de creștere lentă a tensiunii, atingind la sfîrșitul încărcării 1,81-1,85 V.

Tensiunea de descărcare începe practic la 1,28 V, coborînd repede la 1,22-1,20 V (din cauza reacției de formare a bioxidului de nichel). Urmează o perioadă lungă de descreștere lentă, care este limitată în exploatare la valori de 1-1,1 V. Tensiunea medie de descărcare este de 1,20 V.

Observație. Gradul de descărcare al acumulatorului alcalin nu poate fi determinat după valoarea tensiunii sau după concentrația electrolitului, ci numai după cantitatea de electricitate debitată.

Acumulatorii Cd—Ni (fig. 52 curbele B). Caracteristica de încărcare care începe la o valoare mai mică decât la acumulatorii Fe—Ni are o alură mai favorabilă; la început are loc o creștere lentă a tensiunii, până la 1,4–1,5 V și numai la sfârșitul încărcării se ridică brusc până la 1,75–1,80 V.

Caracteristica de descărcare, la rândul ei, coboară mai lent la acumulatorii de Cd—Ni. Tensiunea medie de descărcare este de 1,2–1,25 V.

83. Capacitatea acumulatorilor alcalini. a) Coborrea bruscă a tensiunii la sfârșitul descărcării se datorește epuizării masei active. Capacitatea depinde deci de cantitatea de masă activă, de porozitatea, structura, gradul de fineță al acestei mase, cum și de contactul dintre masa activă și suportii metalici.

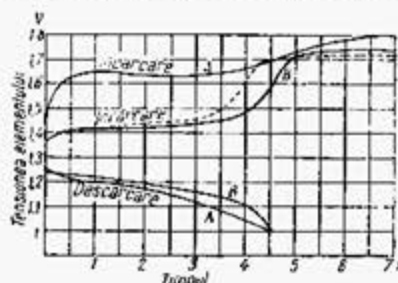


Fig. 52. — Caracteristicile de încărcare și descărcare ale acumulatorilor Fe—Ni (A) și Cd—Ni (B).

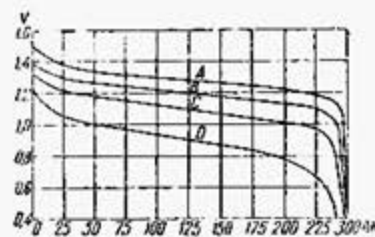


Fig. 53. — Curbele de descărcare a acumulatorului Fe—Ni la diferite intensități de curent.

Consumul teoretic al masei active la acumulatorii Fe—Ni și Cd—Ni este același la plăcile pozitive, și anume de 4,09 g Ni(OH)_2 de fiecare amper-oră. Efectiv însă, sînt necesare la acumulatorii Cd—Ni 8,4 g Ni(OH)_2 de fiecare amper-oră, ceea ce reprezintă un coeficient de utilizare al masei active de circa 40% (el este mai mic, circa 20–22% la acumulatorii Fe—Ni).

Consumul teoretic de masă activă la placa negativă de fier este de 1,042 g/Ah, iar la cea de cadmiu de 2,09 g/Ah. În realitate sînt necesare circa 6 g/Ah Fe, respectiv 4,5 g/Ah Cd deoarece coeficientul de utilizare al masei active a plăcilor negative este de 17–18% la acumulatorii Fe—Ni și de circa 12% la cele Cd—Ni.

Îmbunătățirea coeficientului de utilizare la acumulatorii alcalini constituie problema de bază a fabricării acestor acumulatoare.

La acumulatorii Fe—Ni, capacitatea este determinată de aceea a plăcii pozitive, spre deosebire de acumulatorii Cd—Ni, la care capacitatea acumulatorului depinde de placa negativă.

β) Creșterea curentului de descărcare coboară capacitatea în Wh, deoarece crește căderea de tensiune internă, însă, spre deosebire de acumulatorii de plumb, caracteristica de descărcare are același aspect la descărcări cu intensități mari ca și la intensități mici de curent; curbele sînt aproape paralele, ceea ce determină o variație mică a capacității în amper-ore (fig. 53).

γ) Coborrea temperaturii. Acumulatorii Fe—Ni pierd din capacitatea corespunzătoare la 18°C, cîte 2% de fiecare grad centigrad al coboririi de temperatură. La acumulatorii Cd—Ni, micșorarea capacității cu temperatura este mult mai mică. Limita inferioară de întrebuințare (temperatura critică) a acumulatorilor Fe—Ni este de –5°C, iar a celor de Cd—Ni este de –20°C. Cauza pierderii capacității (în afară de efectele normale ale coboririi de temperatură) la acumulatorii Fe—Ni este pasivizarea fierului și creșterea rezistenței interioare a acumulatorului.

În exploatarea la temperaturi joase, acumulatorii alcalini (Fe—Ni) dau rezultate mai bune la descărcări continue, deoarece căldura produsă prin efectul Lenz-Joule ridică temperatura de funcționare.

Pierderea de capacitate a acumulatorului ca urmare a coboririi de temperatură este un fenomen trecător. Prin revenirea temperaturii, capacitatea acumulatorului se restabilește. Întrebuințarea unui electrolit mai concentrat, de densitatea 1,27–1,30, permite păstrarea unei capacități mai mari în condiții de funcționare la temperaturi scăzute.

δ) Funcționarea la temperaturi ridicate este de asemenea defavorabilă, limita superioară fiind de 50°C, peste care la plăcile negative fierul trece sub formă solubilă în electrolit, iar la plăcile pozitive are loc descompunerea hidratului de nichel. Aceste procese fiind nereversibile, pierderea capacității este definitivă.

Acumulatorii Cd—Ni sînt sensibile chiar la temperaturi mai mari de 25°C. S-a observat însă că înlocuirea electrolitului KOH cu NaOH permite o funcționare cu plină capacitate la 30–35°C.

Capacitatea scade însă foarte repede la temperaturi mai înalte.

ε) Influența impurităților conținute în masa activă sau în electrolit. Conținutul de 0,1% calciu, după V. S. Lizlov, în placa negativă scade capacitatea ei cu 7–10%. Cînd cantitatea de calciu ajunge la 0,5%, capacitatea scade la 0 (după cîteva cicluri de funcționare). Prezența manganului (sub forma de Mn(OH)_2 și MnO_2) scade de asemenea capacitatea acumulatorului. O influență defavorabilă o are prezența ionului CO_3^{2-} , provenit din CO_2 din aer, sau din impuritățile conținute în electrolit. De aceea se prevede în instrucțiuni un conținut de maximum 30 g/l K_2CO_3 (sau Na_2CO_3) în electrolit și se prescrie schimbarea periodică a electrolitului.

84. Durata în serviciu. Acumulatorii Cd—Ni funcționează în condiții normale de exploatare, minimum 500 cicluri înainte de a pierde 20% din capacitatea lor nominală. Acumulatorii Fe—Ni, în aceleași condiții, rezistă la 1 000 cicluri de funcționare (descărcări și încărcări).

85. Randamentul acumulatorilor alcalini. Randamentul în Ah al acumulatorilor Fe—Ni variază între 70 și 80% iar în Wh el este cuprins între 50 și 60%. Pentru acumulatorii Cd—Ni randamentele respective sînt 75–80% și 60–65%.

86. Autodescărcarea acumulatorilor alcalini. În primele 24–80 ore după încărcare, pierderea de capacitate este importantă, fiind de 10–12%. Acest fapt este produs de descompunerea, într-un acumulator proaspăt încărcat, a bioxidului de nichel. Apoi autodescărcarea scade, stabilindu-se la o valoare zilnică medie de 0,5% (fig. 54).

Autodescărcarea este produsă și de procesele de autooxidare a fierului la placa negativă (mai ales la temperaturi mai ridicate), conform reacției $\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Fe(OH)}_2 + \text{H}_2$.

La acumulatorii Cd—Ni, pierderea capacității prin autodescărcare este mai mică decât la acumulatorii Fe—Ni.

87. Construcția electrozilor și fabricarea acumulatorilor alcalini. α) Electrozi pozitivi. Placa pozitivă conține ca materie activă hidrat negru de nichel Ni(OH)_2 , care se prepară foarte greu pe cale chimică. El se obține ușor prin oxidare electrochimică (în timpul formării acumulatorului) din hidrat verde de nichel Ni(OH)_2 care la rândul lui, se obține fără mari dificultăți prin leșierea soluțiilor de sulfat sau de azotat de nichel. Masa activă fiind rău conducătoare de electricitate,

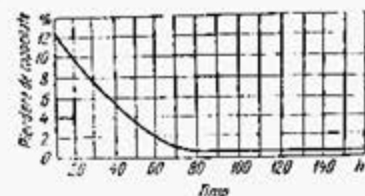


Fig. 54. — Curba autodescărcării acumulatorului Cd—Ni.

i se adaugă la acumulatoarele Fe—Ni nichel metalic sub formă de solzi foarte subțiri (0,001 mm), fiecare având o suprafață de 1,6 mm²; la acumulatoarele Cd—Ni, materialul conducător este grafitul în solzi de o anumită structură și dimensiuni (grafitul pulbere nu este indicat, trecând ușor prin orificiile tablei perforate care îmbracă electrodul pozitiv) și prezentând o suprafață mai mare de contact cu masa activă.

Electrodul pozitiv al acumulatorului Fe—Ni este construit din tuburi de tablă (benzi) de oțel subțire (0,075 mm), perforată (87 orificii/cm²) și nichelată (fig. 55).

Fabricarea acestor tuburi se face la mașini automate. Pentru a le mări rezistența mecanică, fiecare tub este îmbrăcat cu cîte opt inele de oțel nichelat

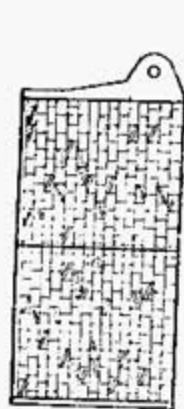


Fig. 55. — Electro- dui pozitiv al acu- mulatorului Fe—Ni.



Fig. 56. — Tubușo- rul electrodului po- zitiv al acumula- torului Fe—Ni.



Fig. 57. — Electro- dui pozitiv al acu- mulatorului Ni—Cd.



Fig. 58. — Lamela electrodului nega- tiv Fe—Ni.

(fig. 56). Umplerea se face sub o presiune de 140 kg/cm², la mașini speciale care introduc alternativ cîte un strat de materie activă (0,03 g hidrat verde de nichel) și un strat de material conducător (0,005 g nichel metalic). Sînt 315 straturi de hidrat de nichel, alternînd cu 315 straturi solzi de nichel într-un tub de 100 mm lungime. Tuburile se fabrică cu diametre de 4,8 mm și 6,4 mm și cu lungimi variînd între 87 și 108 mm. Ele se închid la capetele de jos și de sus cu un vîrf prominent în formă conică, prin care se fixează în ramele din tablă de oțel profilat. O ramă cuprinde un etaj sau două etaje de tuburi (rareori trei). Fiecare etaj cuprinde mai multe tuburi strîns lipite unul de altul, așezate alternativ, un tub rulat la dreapta lîngă un tub rulat la stînga, pentru a da o rezistență mai mare la eforturi. Numărul tuburilor pe etaj și numărul etajelor depind de capaci- tatea necesară. Un tub de 100 mm lungime la un curent de descărcare de 0,25 A are o capacitate de 1,25 Ah.

Electrodul pozitiv al acumulatorului Cd—Ni este aproape identic cu cel negativ (v. § 87 β), variînd numai grosimea; el este mai gros cu 5 mm (fig. 57).

Masa activă este hidrat verde de nichel Ni(OH)₂, care se transformă, în timpul formării, în hidrat negru de nichel Ni(OH)₃. Materialul conducător este grafitul. Masa activă se prezează sub formă de brichete mici. Placa este formată dintr-o ramă conținînd mai multe lamele. Fiecare lamelă cuprinde două jumă-

tăți (superioară și inferioară), formînd o cutioară dreptunghiulară din tablă (bandă) de oțel de 0,1 mm, perforată (suprafața orificiilor = 5% din suprafața totală) în interiorul cutiei se așază brichete de masă activă. Lamelele se închid și se introduc în rame profilate. Numărul lamelor variază cu capacitatea necesară.

Construcția plăcii negative la acumulatorul Cd—Ni este aceeași cu a plăcii pozitive.

β) *Electrodul negativ.* Electrozi negativi la acumulatoarele Fe—Ni (fig. 58) au o construcție asemănătoare aceleia a plăcilor pozitive Cd—Ni. Lamelele (cutioarele) au forma plată, cu grosimea de 3 mm, lățimea de 12,5 mm și lungimea de 75 mm. Ele sînt făcute din tablă de oțel perforată și nichelată. Ramele au mai multe despărțituri, cîte una pentru fiecare lamelă și sînt confecționate din oțel profilat și nichelat. Lamelele umplute cu materie activă se montează în deschiză- turile ramei și se presează. Prin presare, ele pătrund adînc în deschiderile ramei devenind solidare cu ea.

Masa activă a acestui electrod este constituită din fier divizat, obținut chimic sau electrochimic, amestecat cu 3—6% oxid de mercur galben HgO, care la prima încărcare trece în stare de mercur metalic; el servește la mărirea conducti- bilității. Puriitatea materiilor prime are un rol deosebit de important; impuri- tățile, chiar în cantități foarte mici, pot produce inutilizarea totală a plăcii.

Electrodul negativ al acumulatorului Cd—Ni are compoziția masei active și modul de preparare diferite de cele ale plăcii negative Fe—Ni. Partea compo- nentă principală o constituie cadmiul spongios amestecat cu 15% fier spongios, care are aici rolul de a împiedica «tasarea» (comprimarea) masei active. Acest amestec se obține uneori pe cale electrochimică, prin depunerea catodică (catod de fier) simultană a cadmiului și a fierului. În stare spongioasă, din soluția conțin- dînd săruri de cadmiu și de fier. Masele active se prepară și pe cale chimică, cu rezultate foarte bune.

Construcția este identică cu aceea a plăcilor pozitive Cd—Ni, plăcile fiind însă mai subțiri (3 mm). Capacitatea acumulatoarelor Cd—Ni fiind determinată de capacitatea plăcilor negative, dimensiunile lamelei negative sînt deseori calcu- late pentru a prezenta o unitate de capacitate; astfel, în unele construcții sovie- tice, lamela negativă are o lungime de 70 mm și o capacitate de 1 Ah.

γ) *Asamblarea.* Grupuri de plăci. Asamblarea se face, fie prin sudarea capetelor plăcilor de același semn (montate în paralel) la barețele colec- toare (Cd—Ni), fie prin introducerea în orificiile cozilor plăcilor a unor buloane filetate (Fe—Ni), distanțarea plăcilor făcîndu-se printr-o pereche de piulițe. Barețele și buloanele sînt prevăzute cu borne verticale care ies prin capacul acumulatorului.

La acumulatoarele Fe—Ni, ca și la acumulatoarele cu plăci de plumb, grupul plăcilor negative are cu o placă mai mult decît cel al plăcilor pozitive. Astfel, la imbinarea celor două grupuri, fiecare placă pozitivă este cuprinsă între două plăci negative, care în același timp constituie plăcile de margine. Între plăci de semn contrar se montează separatoare (izolatoare) perforate, din ebonită sau din materiale plastice sintetice. Plăcile de margine se izolează și față de pereții vasului.

La acumulatoarele Cd—Ni numărul plăcilor într-un grup pozitiv este mai mare cu o placă decît într-un grup de plăci negative. Plăcile pozitive de margine nu se izolează față de vas, care este legat astfel la polul pozitiv.

Un grup de plăci pozitive, imbinat cu unul de plăci negative și împreună cu izolatoarele respective, se introduce în vasul acumulatorului și se acoperă (etanș) cu un capac care are trei găuri. Prin două găuri trec bornele celor două grupe de plăci, prin cel de a treilea orificiu se face atît umplerea cu electrolit,

cît și evacuarea gazelor; acest orificiu se închide cu un dop de construcție specială, format dintr-un tub de oțel filetat și un ventil de cauciuc (fig. 59).

Vasele se confecționează prin sudarea foilor de tablă de fier ondulată; ele se niclează în interior și în exterior.

Aiut la fundul vasului, cît și la partea sa superioară (sub capac) este lăsat cîte un spațiu liber. Primul - spațiul de nomol - servește la depunerea materiei active care se detașează de pe plăci în timpul funcționării; al doilea - spațiul de gaze servește la adunarea gazelor înainte de evacuare.

88. **Electrolitul acumulatorilor alcaline.** Se deosebesc: electrolitul de vară și electrolitul de iarnă.

a) **Electrolitul de vară** este o soluție apoasă de sodă caustică, de circa 20-25%, - densitate 1,17-1,19 (21-23° Bé); se întrebuințează la temperaturi ambiante peste 10°C. El poate fi constituit și dintr-o soluție apoasă de potasă caustică de 1,18-1,19 (22-23° Bé). În timpul verii acumulatorii se vor încălzi de preferință în timpul nopții, pentru a se evita încălziri nepermise.

b) **Electrolitul de iarnă** este o soluție de potasă caustică de densitate 1,19-1,21 (23-25° Bé) pentru temperaturi cuprinse între +15°C și -10°C și de 1,27-1,30 (31-33° Bé) pentru temperaturi sub -10°C. Soluția de 20% potasă caustică îngheață la -24°C, iar aceea de 25%, la -38°C (tabela 22).

Puritatea potasei caustice și a sodiei caustice nu este standardizată în R.P.R. În normele sovietice GOST 3894 și 3895/47 sînt date caracteristicile potasei caustice și sodiei caustice pentru acumulatori alcaline.

Fig. 59. - Secțiune într-un acumulator Cd-Ni.

În mod normal se prescrie că potasa caustică, în stare solidă, trebuie să aibă minimum 84,88% KOH, maximum 2-2,5% K₂CO₃, 0% KCl, 0% K₂SO₄ și 0,075% K₂SiO₃ (în mod corespunzător se poate deduce și pentru soda caustică).

Tabela 22. Conținutul în potasă caustică al soluțiilor de electroliti ale acumulatorilor alcalini

Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de KOH în 1 l de soluție g	Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de KOH în 1 l de soluție g	Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de KOH în 1 l de soluție g
1,100	13	132	1,241	28	324	1,124	33	582
1,108	14	143	1,252	29	338	1,138	41	605
1,116	15	153	1,263	30	353	1,153	45	631
1,125	16	167	1,274	31	368	1,168	48	655
1,131	17	178	1,285	32	385	1,183	47	679
1,142	18	188	1,297	33	399	1,198	48	706
1,152	19	203	1,308	34	416	1,214	49	731
1,162	20	216	1,320	35	432	1,230	50	756
1,171	21	229	1,332	36	449	1,246	51	779
1,180	22	242	1,345	37	469	1,263	52	811
1,190	23	255	1,357	38	487	1,280	53	840
1,200	24	269	1,370	39	506	1,297	54	870
1,210	25	282	1,383	40	522	1,315	55	902
1,220	26	293	1,397	41	543	1,334	56	940
1,231	27	309	1,410	42	563			

În unele cazuri, puritatea se stabilește prin aspectul exterior al potasei. Unele uzine producătoare adaugă la electrolit și 50 g/l hidrat de litiu (LiOH), ceea ce mărește capacitatea (acumulatorii Fe-Ni).

Tabela 23. Conținutul în sodă caustică al soluțiilor de electroliti ale acumulatorilor alcalini

Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de NaOH în 1 l de soluție g	Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de NaOH în 1 l de soluție g	Densitatea la 15°C	Grade Baumé	Conținut de NaOH în 1 l de soluție g
1,100	13	96,8	1,220	26	239,7	1,370	59	462,1
1,108	14	105,3	1,231	27	253,6	1,383	60	484,1
1,116	15	114,9	1,241	28	267,4	1,397	61	507,9
1,125	16	124,1	1,252	29	281,7	1,410	62	530,9
1,131	17	134,9	1,263	30	296,8	1,424	63	556,2
1,142	18	145,9	1,274	31	311,9	1,438	64	582,0
1,152	19	155,5	1,285	32	327,7	1,453	65	610,8
1,162	20	166,7	1,297	33	344,7	1,463	66	639,8
1,171	21	177,4	1,308	34	361,7	1,483	67	669,7
1,180	22	188,8	1,320	35	380,5	1,498	68	700,0
1,190	23	201,2	1,332	36	399,6	1,511	69	732,9
1,200	24	213,7	1,345	37	419,6	1,530	70	768,5
1,210	25	226,1	1,357	38	441,0			

Pentru diluarea electrolitului se întrebuințează apa distilată (tabelele 22 și 23). Prepararea soluției se face după următoarea formulă experimentală (aplicabilă și soluției de acid sulfuric):

$$V = \frac{V_0 (A_x - A_0)}{A_1 - A_0} \quad (88.1)$$

în care: V este volumul de alcalii sau acid concentrat (sau diluat) care trebuie adăugat la soluția existentă (sau apă) pentru a se obține volumul necesar de concentrație dorită;

V₀ - volumul necesar de alcalii sau acid;

A₀ - concentrația în grame KOH, NaOH sau H₂SO₄ la litru a soluției diluante (pentru apă A₀ = 0);

A₁ - idem la litru a soluției concentrate;

A_x - idem a soluției necesare.

Exemplul 1. Acumulatorul are nevoie de 2,7 litri electrolit KOH (V₀ = 2,7) de densitate 1,20 (A_x), care trebuie pregătit din electrolit concentrat de densitate 1,41 (A₁) și apă distilată (A₀). Se citește în tabelă conținutul în grame KOH la cele două concentrații: d₁ = 1,41; A₁ = 563 g/l; d_x = 1,20; A_x = 269 g/l:

$$V = \frac{2,7(269 - 0)}{563 - 0} = 1,29 \text{ l.}$$

Sînt necesari deci 1,29 l soluție KOH de densitate 1,41 și 1,41 l apă distilată.

Exemplul 2 (întrebuințat adeseori la trecerea de la electrolit de vară la electrolit de iarnă) d₀ = 1,18; A₀ = 242 g/l KOH; d_x = 1,27; A_x = 362 g/l KOH; d₁ = 1,498; A₁ = 706 g/l KOH. Volumul liber al acumulatorului este de 5 l:

$$V = \frac{5(362 - 242)}{706 - 242} = 1,29 \text{ l.}$$

Se vor lua deci 1,29 l de soluție concentrată de densitate 1,498, care se vor adăuga la 3,71 l soluție existentă (electrolitul de vară) de densitate 1,18.

89. **Încărcarea acumulatorilor alcaline.** α) *Acumulatorii Fe-Ni* prezintă o limită inferioară a intensității curentului de încărcare, provenind din faptul că placa negativă nu poate fi încărcată decât dacă se creează o suficientă polarizare, astfel ca potențialul de descărcare a hidrogenului să se apropie de potențialul necesar reacției care are loc, în timpul încărcării, la electrodul de fier. Acest lucru împiedică întrebuințarea acumulatorilor Fe-Ni ca baterii tampon, funcționând cu curenți slabi de încărcare și descărcare. În timpul încărcării cu intensitatea de curent necesară, se produce o degajare gazoasă abundentă (la început de hidrogen, iar spre sfârșit și de oxigen). Curentul minim de încărcare este indicat de uzina producătoare pentru fiecare tip de acumulator.

β) *Acumulatorii Cd-Ni* nu prezintă această limită inferioară, putând fi încărcate cu intensități mici de curent, deoarece potențialul de descărcare al cadmiului este apropiat de cel al hidrogenului în condițiile procesului care are loc în timpul încărcării.

Se desenează trei regimuri de încărcare a acumulatorilor Cd-Ni raportate la un regim de descărcare în patru ore:

Regim normal, în șapte ore, cu intensitatea de curent normală, care corespunde descărcării în patru ore¹⁾:

$$C_i = \frac{C_{Ah}}{4} \cdot 7.$$

Regim accelerat, în patru ore și jumătate, care se face în trepte: două ore și jumătate cu un curent de încărcare dublu celui normal și două ore cu un curent de încărcare normal; cantitatea de electricitate immagazinată este:

$$C_i = \frac{C_{Ah}}{2} \cdot 2,5 + \frac{C_{Ah}}{4} \cdot 2.$$

Regim lent de încărcare; se face în douăsprezece ore, și anume șase ore cu intensitatea de curent normală și șase ore cu jumătatea intensității normale de curent:

$$C_i = \frac{C_{Ah}}{1} \cdot 6 + \frac{C_{Ah}}{8} \cdot 6.$$

Acest regim lent de încărcare se utilizează numai la punerea în funcțiune a acumulatorilor și la schimbarea electrolitului.

Tensiunea maximă de încărcare este considerată de 1,85–1,95 V la acumulatorii Fe-Ni și de 1,75 V la acumulatorii Cd-Ni. Când încărcarea se face sub 0°C, tensiunea maximă trebuie considerată de 2,0–2,2 V de element. Tensiunea medie de încărcare este de 1,55–1,6 V.

Încărcarea se face legând polul pozitiv al acumulatorului cu polul pozitiv al sursei exterioare de curent și polul negativ al acumulatorului cu cel negativ al sursei. Temperatura maximă admisă în timpul încărcării este de -10°C. În tot timpul încărcării dopurile sînt deschise. După terminarea încărcării, dopurile de ventilație (metalice) se închid după o oră, iar cele de cauciuc după trei, patru ore.

După fiecare 10–12 cicluri de funcționare, și minimum o dată pe lună în cazul unei exploatare neregulate, se face o încărcare completă a acumulatorului.

¹⁾ Se utilizează în genere regimuri de descărcare în patru și în opt ore, pînă la tensiunea finală de 1–1,1 V. Plăcile sînt considerate în stare bună cînd la sfîrșitul descărcării în regim de opt ore au un potențial față de electrodul auxiliar de zinc: placa pozitivă $V_{(+)} = 1,6$ V și placa negativă $V_{(-)} = 0,6$ V.

Încărcarea acumulatorilor alcaline trebuie totdeauna separată de încărcarea acumulatorilor cu plăci de plumb.

Descărcarea se poate face cu intensități de curent diferite (v. nota dela pag. 96). Tensiunea finală nu trebuie să scadă sub:

$$U_f = 1,1 \text{ V pentru regimuri de descărcare peste opt ore;}$$

$$U_f = 1 \text{ V pentru regimuri de descărcare de opt ore;}$$

$$U_f = 0,5 \text{ V pentru regimuri de descărcare de trei ore.}$$

După fiecare 50–60 cicluri și minimum o dată pe an, se va face proba de control a capacității acumulatorului prin două cicluri de încărcare-descărcare. Datele ciclului al doilea determină capacitatea acumulatorului. Acumulatorii avînd o capacitate mai mică decît 80% din capacitatea normală vor fi înlocuite.

Completarea și schimbarea electrolitului. După fiecare încărcare se verifică nivelul electrolitului și se completează dacă este nevoie.

Pentru eliminarea acțiunii vătămătoare a carbonaților și a altor impurități care au putut pătrunde în electrolit în timpul funcționării, electrolitul acumulatorilor Cd-Ni se schimbă la fiecare 100 cicluri și minimum o dată pe an; cel al acumulatorilor Fe-Ni la fiecare 50 cicluri și minimum de două ori pe an. Acumulatorul se descarcă pînă la 1 V pe element, se varsă electrolitul, se spală cu apă distilată (de trei, patru ori) se umple cu electrolit nou și se reîncarcă.

90. **Reguli generale de întreținere a acumulatorilor alcaline.** Se utilizează electrolitul de densitatea prescrisă de fabrica producătoare. Încărcarea începe două ore după umplerea acumulatorului.

Punerea în stare de funcționare se face prin încărcarea timp de șase ore cu o intensitate de curent normală și timp de șase ore cu jumătatea acestei intensități. Apoi acumulatorul se descarcă cu intensitatea de curent normală timp de patru ore.

Aceeași operație se repetă, a doua descărcare fiind continuată pînă la 1 V pe element. Electrolitul se varsă, se spală de două, trei ori cu apă distilată, se umple din nou și se încarcă astfel ca mai sus. Schimbarea electrolitului și spălarea sînt necesare pentru îndepărtarea carbonaților conținuți în masa activă.

Stocarea (păstrarea) acumulatorilor alcaline. Păstrarea a cărei durată este sub 12 luni se poate face în stare încărcată. Este bine să se reîncare acumulatorul din timp în timp.

Păstrarea îndelungată (peste 1 an) se face în stare descărcată, fără electrolit, în încăperi uscate și la o temperatură de maximum 25°C. Este interzisă păstrarea acumulatorilor alcaline împreună cu acumulatoarele cu plăci de plumb.

Repunerea în funcțiune se face conform celor spuse la punerea în funcțiune. Se va face o probă de control a capacității și dacă s-a constatat o pierdere temporară de capacitate, se face o descărcare intensă a acumulatorului prin legarea (timp de opt ore) la polaritățile inverse ale sursei de încărcare (plus la minus și minus la plus). Apoi se încarcă timp de 20 ore, repetîndu-se proba de capacitate. Operația de descărcare intensă poate fi repetată încă o dată.

c) Comparație între acumulatoarele cu plăci de plumb și cele alcaline și alegerea lor

91. **Comparație între acumulatoarele cu plăci de plumb și cele alcaline.** Tensiunea de lucru (de funcționare) este de circa 1,2 V la acumulatoarele alcaline față de circa 2 V la acumulatoarele cu plăci de plumb. Deci pentru a forma o baterie cu tensiuni mai ridicate, trebuie mult mai multe elemente de acumulatori alcaline decît elemente cu plăci de plumb.

Tensiunea inițială de descărcare la acumulatoarele alcaline este considerabil mai mare decît aceea de lucru. Pentru menținerea constantă a tensiunii este

necesar deci un comutator de baterie mai scump și mai puternic decât la bateriile cu plăci de plumb.

Tensiunea finală de încărcare determină de asemenea o exploatare mai complicată a bateriilor alcaline.

Funcționarea în tampon este îngreuiată la acumulatorii alcalini prin diferența mare a tensiunii finale de descărcare față de tensiunea de încărcare și față de tensiunea inițială de lucru.

Înlocuirea unei instalații cu acumulatori cu plăci de plumb printr-o instalație cu acumulatori alcalini implică transformarea completă a instalației și a aparatelor de măsură și de comandă.

Randamentul acumulatorilor alcalini, mai ales cel de energie, este mai mic decât la acumulatorii cu plăci de plumb. În multe cazuri (regimuri lungi de descărcare), acest neajuns este compensat prin autodescărcarea mai mică a acumulatorilor alcalini.

Rezistența interioară este mai mare la acumulatorii alcalini; de exemplu, la o anumită capacitate a acumulatorului, rezistența acumulatorului alcalin este de 0,003 Ω , ajungând, la sfârșitul descărcării, la 0,0075 Ω , față de 0,0016 Ω la acumulatorul cu plăci de plumb. Considerând tensiunile de lucru respective, curentul de scurtcircuit (curent maxim) la acumulatorul alcalin este de 240 A, iar la acumulatorul cu plăci de plumb, de 1 250 A. Această intensitate a curentului de descărcare limitată la acumulatorii alcalini îngreuiază utilizarea lor în multe domenii.

Costul acumulatorilor alcalini este mult mai mare decât cel al acumulatorilor cu plăci de plumb; raportat la costul de înmagazinare a unui watt-oră realizat de un acumulator cu plăci de plumb cu plăci pastate (considerat 100), el este: la acumulatorul cu plăci tubulare de plumb — 166; la cel cu plăci de mare suprafață — 183; la acumulatorul alcalin Ni—Cd — 400.

Funcționarea la temperaturi joase și medii. Acumulatorii alcalini Fe—Ni nu pot funcționa sub — 5 °C. Acumulatorii alcalini (în special Cd—Ni) prezintă pierderi permanente de capacitate la temperaturi peste 30—40 °C.

Controlul stării de descărcare la acumulatorii cu plăci de plumb se face ușor prin determinarea tensiunii la borne în timpul funcționării și a densității electrolitului. Acest mod de control nu este utilizabil la acumulatorii alcalini, la care starea de descărcare nu se poate constata decât prin măsurarea numărului de amper-ore sau de watt-ore debitate, față de capacitatea completă a acumulatorului la regimul de descărcare considerat.

Tabela 24. Compararea capacității acumulatorilor la diferite regimuri de descărcare

Element cu plăci de plumb	Durata de descărcare în ore					
	10	8	6	4	2	1
	Capacitatea în %					
Fe—Ni	100	75	58	78	63	50
Cd—Ni	100	93	97	96	90	76
	100	99	99	98	94	85

Robustetea construcției este mult mai mare la acumulatorii alcalini, atât din punct de vedere mecanic (rezistența la zguduiri, vibrații, loviri etc.), cât și din punct de vedere electric (supraîncălziri sau supradescărcări, păstrarea în orice stare de încărcare sau descărcare etc.).

Tabela 25. Compararea capacității specifice a acumulatorilor

Tipul acumulatorului	Wh/kg	Wh/dm ³
cu plăci de plumb		
— mare suprafață	10	30
— plăci tubulare	17	50
— plăci pastate	25	71
alcaline — Cd—Ni	25	67

Întreținerea este mai simplă la acumulatorii alcalini.

Durata de serviciu este mai lungă la acumulatorii alcalini (mai ales Fe—Ni transportabile).

Autodescărcarea este de câteva ori mai mică la acumulatorii alcalini decât la acumulatorii cu plăci de plumb.

Variația regimului de descărcare influențează mai puțin capacitatea în amper-ore la acumulatorii alcalini (tabela 24).

Capacitatea specifică de masă și de volum este mai mare la acumulatorii alcalini decât la cele cu plăci de plumb. Numai acumulatorii cu plăci de plumb pastate au aproximativ aceeași capacitate specifică de volum cu acumulatorii Cd—Ni (tabelele 25 și 26).

Tabela 26. Caracteristicile acumulatorilor de aceeași capacitate

Tipul acumulatorului	Capacitatea		Tensiunea medie la descărcare V	Regim de descărcare A	Greutatea kg	Capacitatea specifică Wh/kg
	Ah	Wh				
Fe—Ni	215	294	1,2	46,0	9,4	31,2
Cd—Ni	250	305	1,22	31,2	12,3	25,0
Pb — tracțiune	250	490	1,96	50,0	22,2	22,2
Pb — tracțiune	116	269	1,84	146	22,2	12,1

92. Alegerea tipului de acumulator. a) Acumulatorii cu plăci de plumb se vor alege în următoarele cazuri:

— instalații staționare importante: costul este considerabil mai mic; întreținerea este asigurată de personalul de deservire existent la astfel de instalații, condițiile de funcționare sînt stabile și nu necesită robustețea excepțională a acumulatorilor alcalini;

— acumulatori de pornire a motoarelor termice; aceste acumulatori trebuie să fie în măsură să furnizeze în timp scurt, de la câteva secunde la câteva minute, curenți de foarte mare intensitate, ceea ce se poate obține ușor la acumulatorii cu plăci de plumb datorită rezistenței lor interioare mici.

Observație. În prezent se fabrică acumulatori alcalini de construcție specială (plăci sinterizate) care pot debita curenți comparabili cu cei debitați de acumulatorii cu plăci de plumb de aceeași capacitate, însă costul lor este foarte mare.

b) Acumulatorii alcalini se vor alege în următoarele cazuri:

— funcționarea în condiții grele, mecanice sau electrice, în care se cere o mare robustețe, întreținerea e mai simplă și un volum mic al acumulatorului.

Observație. Întreținerea acumulatorilor alcalini este limitată însă la intensități mijocii de curent.

— iluminatul vagoanelor de cale ferată, care cere robustețe mare și insensibilitate la zdruncinări și suportarea unei supraîncălziri lungi;

— aparatele transportabile de telecomunicații, datorită mai ales siguranței de funcționare și greutății mici.

γ) Întrebuințările în care cele două tipuri de acumulatori dau principial rezultate egale și la care alegerea se face de la caz la caz sînt:

— tracțiune electrică cu acumulatori (electrocare, locomotive electrice de manevră sau pentru mine, automobile electrice etc.);

— acumulatori de laborator;

— acumulatori pentru scopuri speciale (aviație, semnalizare etc.).

d) Principalele tipuri de acumulatori cu plăci de plumb fabricate în R.P.R.

93. Acumulatori pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță. Se execută conform STAS 443-52. Aceste acumulatori sunt de trei categorii:

α) Acumulatori cu plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative sac.

β) Acumulatori cu plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative grătar, cu oxizi raportați.

γ) Acumulatori cu plăcile pozitive și negative grătar, cu oxizi raportați.

α) Acumulatori cu plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative sac (fig. 60) se fabrică în două tipuri:

— tipul marcat ZO 30, la care suprafața utilă a plăcii pozitive este de 30 dm² și

— tipul marcat ZO 40, la care suprafața utilă a plăcii pozitive este de 40 dm².

Numărul de plăci pozitive montate în fiecare element se indică prin cifre romane scrise înaintea literei Z.

β) Acumulatori cu plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative grătar, cu oxizi raportați (fig. 61) se fabrică de un singur tip marcat DGO 14/I, la care suprafața utilă a plăcii pozitive este de 14 dm². Numărul de plăci pozitive montate în fiecare element se indică prin cifre romane scrise după cifra 14.

Tabela 27. Tensiunea minimă pe element la acumulatorii cu plăci de plumb pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță

Tipul acumulatorului	Tensiunea pe element, în V				
	Regimul de descărcare, în h				
	1	2	3	5	10
ZO 30, ZO 40	1,75	1,75	1,8	1,8	1,83
Le, Dle, DGO	—	—	—	—	1,83
5 Wn	—	—	—	—	1,83

Observații. — Descărcarea trebuie întreruptă chiar când tensiunea unui singur element de baterie scade sub valorile din tabelă.

Tabela 28. Randamentul acumulatorilor cu plăci de plumb pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță

Tipul acumulatorului	Regimul de descărcare, în h					
	3	5	10	3	5	10
	Randament minim în cantitate de electricitate			Randament minim în energie		
ZO 30, ZO 40	84%	84%	84%	65%	65%	65%
Le, Dle, DGO 14	—	—	84%	—	—	65%

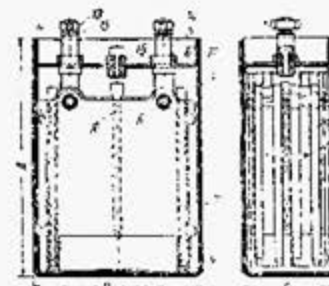


Fig. 60. — Element tip ZO 30 și ZO 40 : 1 — placă pozitivă; 2 — placă negativă de mijloc; 3 — placă negativă de margine, suptă (lucrează pe o singură față); 4 — bornă pozitivă; 5 — bornă negativă; 6 — tub de sticlă pentru susținerea plăcilor; 7 — tub izolator de sticlă; 8 — tub izolator de sticlă; 9 — legătura dintre picioarele plăcilor negative; 10 — vas de sticlă; 11 — capac de ebonită; 12 — bușe de porțelan (poate lipsi); 13 și 14 — șuruburi de bronz încorporate în bachelită; 15 — șabie; 16 — dop cu gaură de ventilație (sticla poate lipsi).

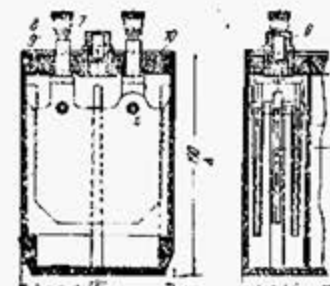


Fig. 61. — Element tip DGO 14/I: 1 — vas de sticlă presată; 2 — placă pozitivă de mare suprafață; 3 — placă negativă grătar, cu oxizi raportați; 4 — vergea de ebonită sau tub de sticlă pentru susținerea plăcilor; 5 — capac de ebonită; 6 — dop de porțelan; 7 — bornă de bachelită; 8 — piuliță de alamă încorporată în borna de bachelită; 9 — șurub de alamă încorporat în plumbul punții de asamblare a plăcilor; 10 — mastic de etanșare.

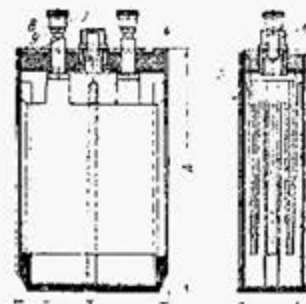


Fig. 62. — Element tip Le și Dle: 1 — vas de sticlă presată; 2 — placă pozitivă grătar; 3 — placă negativă grătar; 4 — mastic de etanșare; 5 — capac de ebonită; 6 — dop de porțelan; 7 — bornă de bachelită; 8 — piuliță de alamă încorporată în bachelită; 9 — șurub de alamă încorporat în plumbul punții de asamblare a plăcilor.



Fig. 63. — Baterie cu 5 elemente Wn: 1 — vas de sticlă presată; 2 — placă negativă; 3 — placă pozitivă; 4 — capac de ebonită; 5 — bușe de porțelan; 6 — bornă terminală; 7 — bușe; 8 — punte de legătură; 9 — mastic de etanșare.

Tabela 29. Dimensiunile vasului, numărul plăcilor, greutatea unui element la acumulatori cu plăci de plumb pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță

Tipul acumulatorului	Dimensiunile exterioare ale vasului mm					Numărul plăcilor			Greutatea medie a unui element kg	
	Înălțime A	Lățime B	Lungime C	Grosime pereți	Grosime fund	Pozitive	Negative		Fără acid	Cu acid
							1/1	1/2		
I ZO 30	225	160	48	5 ± 1	6 ± 2	1	—	2	4	5,3
II ZO 30	225	160	83	—	—	2	1	2	6,0	5,1
I ZO 40	270	160	48	—	—	1	—	2	5,2	7,2
II ZO 40	270	160	83	—	—	2	1	2	8,6	11,1
III ZO 40	271	162	120	6 ± 1	7 ± 3	3	2	2	12,6	16,6
IV ZO 40	271	162	155	—	—	4	3	2	16,8	21,8
V ZO 40	271	162	190	—	—	5	4	2	21,5	27,5
DO 14/1	190	120	104	—	—	2	4	—	5,5	6,5
Le 1	210	123	45	—	—	1	2	—	2	2,44
Le 2	210	123	74	—	—	4	3	—	3,85	4,11
Le 3	210	123	94	4 ± 1 în părțile neprofilate	—	2	4	—	3,95	5,05
Le 4	210	123	125	—	—	3	5	—	5	6,8
Dle 1	210	123	84	—	—	2	4	—	4	5
Dle 2	210	123	136	—	—	4	6	—	6	7,5
5 Wn	94	52	112	—	—	5	5	—	0,75	0,82

Tabela 30. Intensitatea maximă a curentului de încărcare și descărcare la acumulatori cu plăci de plumb pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță

Tipul acumulatorului	Regimurile de descărcare, în h										Intensitatea maximă a curentului de încărcare A	
	P	1		2		3		5		10		
		C	I	C	I	C	I	C	I	C		I
I ZO 30	2	10	10	14	7	18,5	5,5	18,5	3,7	22	5,5	
II ZO 30	2	20	20	28	14	33	11	37,5	7,5	44	11	
I ZO 40	2	14	14	18,5	9,25	22	7,3	25	5	30	7,3	
II ZO 40	2	28	28	37	18,5	44	14,6	50	10	60	14,6	
III ZO 40	2	42	42	55	27,5	66	22	75	15	90	22	
IV ZO 40	2	56	56	74	37	88	29,3	100	20	120	29	
V ZO 40	2	70	70	92	46	110	36,6	125	25	150	37	
DGO 14/1	4	—	—	—	—	—	—	—	—	10	1	
Le 1	2	—	—	—	—	—	—	—	—	12	1,2	
Le 2	2	—	—	—	—	—	—	—	—	24	2,4	
Le 3	2	—	—	—	—	—	—	—	—	36	3,6	
Le 4	2	—	—	—	—	—	—	—	—	48	4,8	
Dle 1.....	4	—	—	—	—	—	—	—	—	12	1,2	
Dle 2.....	4	—	—	—	—	—	—	—	—	24	2,4	
5 Wn	10	—	—	—	—	—	—	—	—	0,7	0,07	

C este capacitatea, în Ah, la + 25 °C;
I — intensitatea maximă a curentului de descărcare, în A.
Tensiunea nominală pe element se consideră de 2 V.

γ) Acumulatori cu plăcile pozitive și negative grătare, oxizi raportați (fig. 62 și 63), se fabrică în trei tipuri: Le; Dle; Wn.

Numărul plăcilor pozitive montate în fiecare element al bateriilor Le și Dle se indică prin cifre arabe scrise după litere. Plăcile negative extreme lucrează pe o singură față. Bateriile cu elemente duble (2 elemente într-un vas bicelular) se indică cu litera D. Numărul de elemente al bateriei Wn se indică prin cifre arabe scrise înaintea literelor.

Caracteristicile principale ale acestor tipuri de acumulatori sunt cuprinse în tabelele 27—31.

Tabela 31. Autodescărcarea în circuit deschis la acumulatori cu plăci de plumb pentru telecomunicații, laboratoare și iluminat de siguranță

Durata inactivității acumulatorului exprimată în zile (24 h)	Pierdere admisibilă, în procente, din capacitate, la regimul de 10 h	Pierdere medie admisibilă pe zi, în procente, din capacitate, la regimul de 10 h
30	30	1
15	22,5	1,5
6	11,3	1,67
3	6	2

Observații. — În timpul inactivității acumulatorului umplut cu acid nu trebuie să se depășească valorile maxime admisiibile indicate în tabelă.

94. Acumulatori cu plăci de plumb pentru automobile și motociclete (fig. 64, 65, 66) se execută conform STAS 441—52. Ele sunt de 6 sau de 12 V și de capacități diferite. Ele pot fi montate

- în monoblocuri de ebonită cu 3 sau 6 celule fiecare;
- în celule individuale de ebonită grupate în cutii de lemn.

Tabela 32. Dimensiunile plăcilor pozitive și negative ale acumulatorilor cu plăci de plumb pentru automobile și motociclete

Tipul	Capacitatea la regimul de 10 h, Ah	Înălțime mm	Lățime mm	Grosime mm
E	15,0	143	135	3,0
DI	12,5	143	125	2,4
CI	11,0	143	105	2,4
F	3,5	68	85	2,4

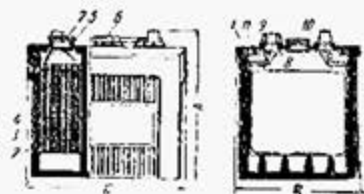


Fig. 64. — Baterii de acumulatori montate în monobloc de ebonită, pentru automobile:

1 — monobloc de ebonită; 2 — placă pozitivă; 3 — placă negativă; 4 — izolație între plăci, de decelit, cu planșetă de lemn netedă sau planșetă de lemn rigată; 5 — capace de element; 6 — legătură de plumb între elemente; 7 — dop de element; 8 — punte de asamblare a plăcilor de aceeași polaritate; 9 — bornă cu clemă pentru cablu; 10 — plujă de etanșare.

Tabela 33. Dimensiunile exterioare ale acumulatorului și greutatea elementului în acumulatorii cu plăci de plumb pentru automobile și motociclete

Tipul	Dimensiunile exterioare, în mm			Greutatea, în kg	
	Înălțime A	Lățime B	Lungime C	Fără acid	Cu acid
3 F 2	160	80	90	2,15	2,45
3 F 3	160	80	120	3	3,40
3 Df 6	220	175	230	18	18,5
3 Cf 7	260	190	270	17	19,5
3 E 6	240	175	260	20,5	24
3 E 6 B	240	165	485	20,5	24
3 E 7	240	175	285	24	28
3 E 7 B	240	190	510	24	28
3 E 8	240	175	325	28	34
3 E 10 B	240	185	510	32,8	37,5
6 Df 4	220	175	310	21	24
6 Df 5	220	175	365	26	30
6 E 6 he	240	200	510	40	48
6 E 7 he	240	220	510	45	55
6 E 10 he	250	290	520	60	70
6 E 10 m	260	310	520	72	80

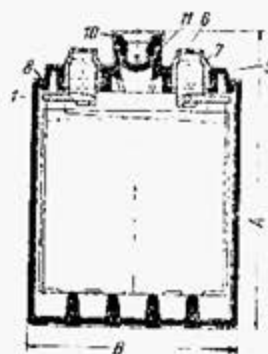


Fig. 65. — Baterie de acumulatori montate în celule individuale de ebonită, grupate în cutii de lemn, pentru automobile;

1 — cutie de ebonită; 2 — placă pozitivă; 3 — placă negativă; 4 — izolație de decelit, perforată; 5 — planșetă de lemn, netedă, pentru izolație între plăci; 6 — bornă; 7 — bușă de plumb incorporată în capac, pentru etanșare; 8 — mastic de etanșare; 9 — capac de ebonită; 10 — dop; 11 — garnitură dopului; 12 — cutie de lemn pentru gruparea elementelor.

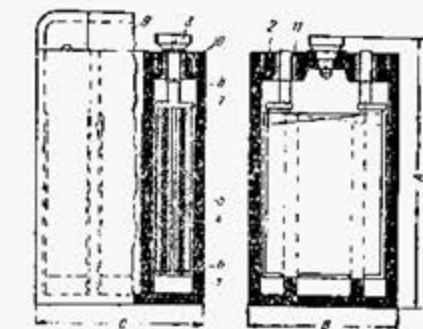


Fig. 66. — Baterie de acumulatori montate în monobloc de ebonită, pentru motociclete;

1 — monobloc de ebonită; 2 — capac de ebonită; 3 — dop de ebonită; 4 — placă negativă; 5 — placă pozitivă; 6 — izolație între plăci; 7 — punte de asamblare a plăcilor; 8 — borna plăcilor; 9 — capacul general al bateriei; 10 — mastic de etanșare; 11 — bușă de etanșare.

Acumulatorii electrice cu plăci de plumb pentru automobile și motociclete au plăci tip grătar, cu oxizi raportați. Caracteristicile principale ale acestor acumulatori sunt date în tabelele 32—34.

Randamentul:

— în cantitate de electricitate 84%;

— în energie 65%.

Autodescărcare — aceeași ca în cazul acumulatorilor de telecomunicații (tabela 31).

Tabela 34. Intensitatea maximă a curentului de încărcare și descărcare la acumulatorii cu plăci de plumb pentru automobile și motociclete

Tipul	Tensiunea V	Capacitatea la + 25°C Ah		Intensitatea maximă a curentului, A		
		Descărcarea în		Descărcarea de probă		Încărcarea
		10 h	20 h	10 h	Șoc	
3 F 2	6	7	—	0,7	—	0,4
3 F 3	6	11	—	1,1	—	0,7
3 Df 6	6	75	90	7,5	225	5
3 Cf 7	6	77	95	7,7	231	5
3 E 6	6	90	120	9	270	6
3 E 6 B	6	90	120	9	270	6
3 E 7	6	105	140	10,5	315	7
3 E 7 B	6	105	140	10,5	315	7
3 E 8	6	120	160	12	315	7
3 E 10 B	6	150	200	15	450	10
6 Df 4	12	50	60	5	150	3
6 Df 5	12	62,5	75	6,25	187,5	3,5
6 E 6 he	12	90	120	9	270	6
6 E 7 he	12	105	140	10,5	315	7
6 E 10 he	12	150	200	15	450	10
6 E 10 m	12	150	200	15	450	10

Observații. — Tensiunea minimă 1,8 V. La probe de șoc (cu o intensitate mare) tensiunea finală proceșă este de 1,33 V pe element. Tensiunea la sfârșitul încălzirii: 2,5—2,75 V pe element.

95. Acumulatori staționare (fig. 67 și 68) se execută conform STAS 445-52. Aceste acumulatori au plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative sac. Ca electrolit utilizează acidul sulfuric diluat.

Acumulatorii staționare sunt de două categorii:

α) Acumulatori pentru descărcări mijlocii și lente, notate cu L, care pot fi descărcate la regimuri cuprinse între 10 și 3 h.

β) Acumulatori pentru descărcări rapide, notate cu Ls, care pot fi descărcate și la regimuri cuprinse între 2 și 1 h.

Ambele categorii, L și Ls, nu se deosebesc una de alta decât după felul și dimensiunile conexiunilor dintre elemente.

Plăcile acestor acumulatori sînt de 3 mărimi, avînd următoarele capacități pe pereche + și -, la un regim de descărcare de 10 h:

$$L_1 = 36 \text{ Ah} \quad L_2 = 72 \text{ Ah} \quad L_4 = 144 \text{ Ah}$$

Diversele mărimi de elemente se notează cu literele L sau Ls urmate de cifrele 1 la 124. Aceste cifre reprezintă rezultatul împărțirii valorii capacității la regimul de 10 h a elementului respectiv, prin 36, care este capacitatea unei plăci.

Elementele $L_1 \dots L_{28}$ sînt montate în vase de sticlă.

Elementele $L_{29} \dots L_{124}$ pot fi montate fie în vase de sticlă, fie în vase de lemn căptușite cu foi de plumb.

Vasele de lemn căptușite cu foi de plumb pot fi înlocuite cu vase de ceramică, material plastic, ebonită, dacă acestea corespund condițiilor de rezistență mecanică, inatacabilitate de către acid și conductibilitate termică.

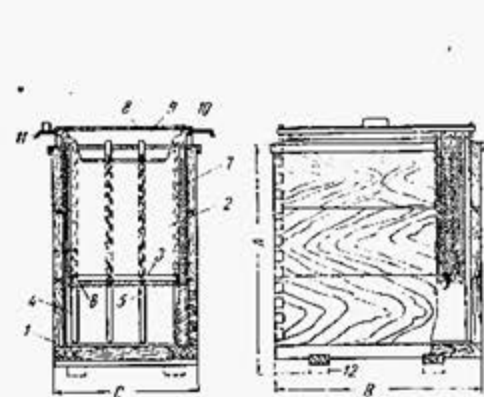


Fig. 67. — Element de acumulator staționar montat în vas de lemn căptușit cu foi de plumb:

1 — vas de lemn căptușit cu foi de plumb; 2 — placă pozitivă de mare suprafață; 3 — placă negativă sac, pastată; 4 — bețe ovale de margine, pentru presat plăcile; 5 — bețișoare de lemn pentru izolarea și întărirea planșetelor; 6 — planșetă de lemn netedă; 7 — geamuri de sprijin a plăcilor; 8 — geam pentru acoperirea elementului; 9 — geam de protecție laterală; 10 — șină de plumb pentru asamblarea plăcilor; 11 — bornă; 12 — izolatoare.

Elementele $L_{29} \dots L_{124}$ sînt montate în vase de lemn căptușite cu plăci de plumb.

Tensiunea la sfîrșitul încărcării: 2,5...2,75 V pe element.

Greutatea specifică a electrolitului la începutul descărcării, la o temperatură proprie medie de 25°C: $1,205 \pm 0,005$.

Temperatura electrolitului nu trebuie să depășească 40°C. Caracteristicile principale ale acestor acumulatori sînt date în tabelele 35—38.

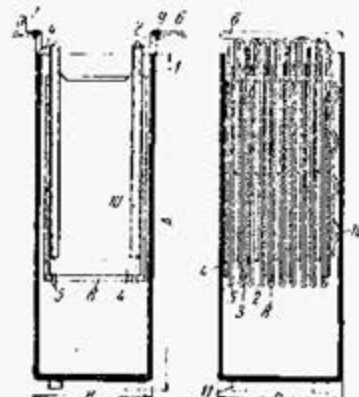


Fig. 68. — Element de acumulator staționar montat în vas de sticlă:

1 — vas de sticlă; 2 — placă pozitivă de mare suprafață; 3 — placă negativă sac, pastată, de mijloc (1/1); 4 — placă negativă sac, pastată, de margine (1/2); 5 — bețișoare de lemn, pentru izolarea și întărirea planșetelor; 6 — șină de plumb pentru asamblarea plăcilor de aceeași polaritate; 7 — bornă; 8 — planșetă de lemn, pentru izolație între plăci; 9 — sudură de asamblare a plăcilor; 10 — arc de plumb anti-monios pentru presarea plăcilor; 11 — izolatoare.

Tabela 35. Dimensiunile vasului, numărul plăcilor, greutatea medie a unui element și cantitatea de acid la acumulatorii cu plăci de plumb staționare

Simbol	Tipul plăcilor	Numărul plăcilor pe element			Dimensiunile exterioare ale vasului, în mm			Grosimea pereților și fundului vasului, în mm		Greutatea medie a elementului fără acid, kg	Cantitatea de acid 1,18 g greutatea specifică, necesară kg	
		Pozitive	Negative		Înălțime cu izolatoare A	Lățime B	Lungime C	Pereți laterali mm	Fund			
			Mijloc	Margine								
L 1	Ls 1	L 1	1	—	2	355	215	75	6	8	9,5	5
L 2	Ls 2	L 1	2	1	2	355	215	110	6	8	13,5	7
L 3	Ls 3	L 1	3	2	2	355	215	145	6	8	18	9
L 4	Ls 4	L 1	4	3	2	355	185	215	6	8	23	11,5
L 5	Ls 5	L 1	5	4	2	355	225	215	6	8	28	14
L 6	Ls 6	L 1	6	5	2	355	265	215	7	8	34	16
L 8	Ls 8	L 2	4	3	2	645	185	215	7	8	43	21
L 10	Ls 10	L 2	5	4	2	645	225	215	7	8	52	26
L 12	Ls 12	L 2	6	5	2	645	265	215	7	8	61	30
L 14	Ls 14	L 2	7	6	2	645	305	215	7	8	70	35
L 16	Ls 16	L 2	8	6	4	645	390	215	7	8	86	42
L 18	Ls 18	L 2	9	7	4	645	430	215	7	8	95	47
L 20	Ls 20	L 2	10	8	4	645	470	215	7	8	104	52
L 22	Ls 22	L 2	11	9	4	645	510	215	7	8	113	56
L 24	Ls 24	L 2	12	10	4	645	550	215	7	8	122	60
L 26	Ls 26	L 2	13	11	4	645	590	215	7	8	131	65
L 28	Ls 28	L 2	14	12	4	645	630	215	7	8	140	70
L 24	Ls 24	L 4	6	5	2	755	325	455	25	30	151	69
L 28	Ls 28	L 4	7	6	2	755	360	455	25	30	160	78
L 32	Ls 32	L 4	8	7	2	755	395	455	25	30	169	87
L 36	Ls 36	L 4	9	8	2	755	435	455	25	30	178	96
L 40	Ls 40	L 4	10	9	2	755	470	465	30	30	187	104
L 44	Ls 44	L 4	11	10	2	755	515	465	30	35	196	113
L 48	Ls 48	L 4	12	11	2	760	555	465	30	35	205	122
L 52	Ls 52	L 4	13	12	2	760	590	465	30	35	214	131
L 56	Ls 56	L 4	14	13	2	760	630	465	30	35	223	140
L 60	Ls 60	L 4	15	14	2	760	665	465	30	35	232	149
L 64	Ls 64	L 4	16	15	2	760	700	465	30	35	241	157
L 68	Ls 68	L 4	17	16	2	760	740	465	30	35	250	166
L 72	Ls 72	L 4	18	17	2	760	775	465	30	35	259	175
L 76	Ls 76	L 4	19	18	2	760	815	465	30	35	268	184
L 80	Ls 80	L 4	20	19	2	760	850	465	30	35	277	193
L 84	Ls 84	L 4	21	20	2	760	885	465	30	35	286	202
L 88	Ls 88	L 4	22	21	2	760	925	465	30	35	295	210
L 92	Ls 92	L 4	23	22	2	760	960	465	30	35	304	219
L 96	Ls 96	L 4	24	23	2	760	1 000	465	30	35	313	228
L 100	Ls 100	L 4	25	24	2	760	1 035	465	30	35	322	237
L 104	Ls 104	L 4	26	25	2	765	1 070	465	30	35	331	246
L 108	Ls 108	L 4	27	26	2	765	1 110	465	30	35	340	255
L 112	Ls 112	L 4	28	27	2	765	1 145	465	30	35	349	264
L 116	Ls 116	L 4	29	28	2	765	1 185	465	30	35	358	272
L 120	Ls 120	L 4	30	29	2	765	1 220	465	30	35	367	281
L 124	Ls 124	L 4	31	30	2	765	1 255	465	30	35	376	290

Tabela 36. Dimensiunile și greutatea medie a plăcilor la acumulatori cu plăci de plumb staționare

Tipul plăcilor	Placa	Dimensiunile plăcilor fără urechi, mm			Greutatea medie kg
		Înălțime	Lățime	Grosime	
+ L ₁	Positivă	165	168	12	2,753
- L ₁	Negativă de mijloc sau întreagă	175	168	8	1,320
- 1/2 L ₁	Negativă de margine sau jumătate	175	168	8	1,0173
+ L ₂	Positivă	335	168	12	5,175
- L ₂	Negativă de mijloc sau întreagă	345	168	8	2,400
- 1/2 L ₂	Negativă de margine sau jumătate	345	168	8	1,860
+ L ₄	Positivă	355	350	10,5	10,600
- L ₄	Negativă de mijloc sau întreagă	365	350	8	5,100
- 1/2 L ₄	Negativă de margine sau jumătate	365	350	8	3,900

Tabela 37. Intensitatea maximă a curentului de încărcare și descărcare; felul și tipul vasului la acumulatori cu plăci de plumb staționare
(Intensitatea maximă a curentului de încărcare și descărcare nu trebuie să depășească valorile indicate în tabel)

Tipul acumula- torului	Regimurile de descărcare, în h												Intensi- tatea maximă a curen- tului de încărcare A	Felul și tipul vasului	
	10		7,5		5		3		2		1				
	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I			
L 1 Ls 1	36 36	3,6 3,6	34 34	4,5 4,5	31 31	6,2 6,2	27 27	9 9	— 24	— 12	— 19	— 19	9 11	S	Lw 1
L 2 Ls 2	72 72	7,2 7,2	68 68	9 9	62 62	12,5 12,5	54 54	18 18	— 48	— 24	— 38	— 38	18 22	S	Lw 2
L 3 Ls 3	108 108	11 11	102 102	13,5 13,5	93 93	18,5 18,5	81 81	27 27	— 72	— 36	— 57	— 57	27 33	S	Lw 3
L 4 Ls 4	144 144	14,5 14,5	136 136	18 18	124 124	25 25	109 109	36 36	— 96	— 48	— 76	— 76	36 44,5	S	Lw 4
L 5 Ls 5	180 180	18 18	170 170	22,5 22,5	155 155	31 31	135 135	45 45	— 120	— 60	— 95	— 95	45 55,5	S	Lw 5
L 6 Ls 6	216 216	21,5 21,5	204 204	27 27	186 186	37 37	162 162	54 54	— 144	— 72	— 114	— 114	54 66	S	Lw 6
L 8 Ls 8	288 288	29 29	272 272	36 36	248 248	50 50	216 216	72 72	— 192	— 96	— 152	— 152	72 89	S	Lw 8
L 10 Ls 10	360 360	36 36	340 340	45 45	310 310	62 62	270 270	90 90	— 240	— 120	— 190	— 190	90 111	S	Lw 10
L 12 Ls 12	432 432	43 43	408 408	54 54	372 372	74 74	324 324	108 108	— 288	— 144	— 228	— 228	108 133	S	Lw 12
L 14 Ls 14	504 504	50 50	476 476	63 63	434 434	87 87	378 378	126 126	— 336	— 168	— 266	— 266	126 155	S	Lw 14
L 16 Ls 16	576 576	58 58	544 544	73 73	490 490	99 99	432 432	144 144	— 384	— 192	— 304	— 304	144 177	D	Lw 16 Lw 16
L 18 Ls 18	648 648	65 65	612 612	82 82	558 558	112 112	486 486	162 162	— 432	— 216	— 342	— 342	162 199	D	Lw 18 Lw 18
L 20 Ls 20	720 720	72 72	680 680	91 91	630 630	124 124	540 540	180 180	— 480	— 240	— 380	— 380	180 221	D	Lw 20 Lw 20

Tabela 37 (urmare)

Tipul acumula- torului	Regimurile de descărcare, în h												Intensi- tatea maximă a curen- tului de încărcare A	Felul și tipul vasului	
	10		7,5		5		3		2		1				
	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I			
L 22 Ls 22	792 792	79 79	748 748	100 100	682 682	136 136	584 584	198 198	— 528	— 264	— 418	— 418	198 244	D	Lw 12 Lw 10
L 24 Ls 24	864 864	86 86	816 816	109 109	744 744	149 149	648 648	216 216	— 576	— 288	— 456	— 456	216 266		D
L 26 Ls 26	936 936	94 94	884 884	118 118	806 806	161 161	702 702	234 234	— 624	— 312	— 494	— 494	234 288	D	
L 28 Ls 28	1008 1008	101 101	952 952	127 127	868 868	174 174	756 756	252 252	— 672	— 336	— 532	— 532	252 310		D
L 24 Ls 24	864 864	86 86	816 816	109 109	744 744	149 149	648 648	216 216	— 576	— 288	— 456	— 456	216 266	P	
L 28 Ls 28	1008 1008	101 101	952 952	127 127	868 868	174 174	756 756	252 252	— 672	— 336	— 532	— 532	252 310		P
L 32 Ls 32	1152 1152	115 115	1088 1088	145 145	992 992	198 198	864 864	288 288	— 768	— 384	— 608	— 608	288 354	P	
L 36 Ls 36	1296 1296	130 130	1224 1224	163 163	1116 1116	223 223	972 972	324 324	— 864	— 432	— 684	— 684	324 399		P
L 40 Ls 40	1440 1440	144 144	1360 1360	181 181	1240 1240	248 248	1080 1080	360 360	— 960	— 480	— 760	— 760	360 443	P	
L 44 Ls 44	1584 1584	158 158	1496 1496	199 199	1384 1384	273 273	1188 1188	396 396	— 1056	— 528	— 836	— 836	396 487		P
L 48 Ls 48	1728 1728	173 173	1632 1632	218 218	1488 1488	298 298	1296 1296	432 432	— 1152	— 576	— 912	— 912	432 531	P	
L 52 Ls 52	1872 1872	187 187	1768 1768	238 238	1612 1612	324 324	1404 1404	468 468	— 1248	— 624	— 988	— 988	468 576		P
L 56 Ls 56	2016 2016	202 202	1904 1904	254 254	1736 1736	347 347	1512 1512	504 504	— 1344	— 672	— 1064	— 1064	504 620	P	
L 60 Ls 60	2160 2160	216 216	2040 2040	272 272	1860 1860	372 372	1620 1620	540 540	— 1440	— 720	— 1140	— 1140	540 664		P
L 64 Ls 64	2304 2304	230 230	2176 2176	290 290	1984 1984	397 397	1721 1721	576 576	— 1536	— 768	— 1216	— 1216	576 708	P	

Observații. — S reprezintă un vas de sticlă suflată; D — două vase de sticlă suflată; P — vase de lemn căptușite cu foi de plumb; C — capacitatea minimă la 25°C, în Ah; I — intensitatea maximă a curentului de descărcare, în A.

Tabela 38. Tensiunea minimă pe element la acumulatori cu plăci de plumb staționare

Tipul acumulatorului	Ls		L			
	1	2	3	5	7,5	10
Regimul de descărcare, în h	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8	1,8
Tensiunea pe element, în V	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8	1,8

Observații. — Descărcarea trebuie întreruptă când tensiunea, chiar a unui singur element din baterie, scade sub valorile indicate în tabelă.

Randament. La descărcările cu intensitatea de curent corespunzătoare regimurilor de 3 până la 10 h, randamentul în cantitate de electricitate nu trebuie să fie mai mic de 84% iar randamentul în energie nu trebuie să fie mai mic de 65%.

Șocuri de curent. La șocuri de curent de scurtă durată adică până la maximum 5 s, intensitatea nu trebuie să depășească valoarea de 2,5 ori mai mare decât curentul corespunzător regimului de 1 h.

Tabela 39. Autodescărcarea în circuit deschis la acumulatori cu plăci de plumb, staționare

Durata inactivității acumulatorului exprimată în zile (24 h)	Pierdere admisibilă, în procente, din capacitate, la regimul de 10 h	Pierdere medie admisibilă pe zi, în procente, din capacitate la regimul de 10 h
30	30	1
15	24	1,5
6	19,2	1,7
3	5,4	1,8

În timpul inactivității acumulatorilor cu electrolit, nu trebuie să se depășească valorile maxime admisibile indicate în tabel.

cărcării, la regimul de 10 h, până la tensiunea finală de 1,8 V, diferența dintre tensiunile elementelor unei aceleiași baterii să nu fie mai mare de 0,1 V.

Condiții pentru exploatarea bateriilor de rezervă.

În timpul folosirii acumulatorilor de tip L sau Ls ca baterii de rezervă, cu încărcare constantă la tensiunea de $2,15 \pm 0,005$ V pe element, bateria trebuie să poată furniza, în decursul a cel puțin 3 luni, 100% din capacitatea de regimul de 10 h, cu respectarea următoarelor condiții:

— intensitatea curentului de încărcare nu trebuie să fie mai mică decât valoarea determinată cu formula:

$$I_n = \frac{0,03 C_n}{36}$$

în care:

I_n este intensitatea curentului de încărcare, în A;

C_n — capacitatea a regimul de 10 h a bateriei;

— după fiecare descărcare peste 50% din capacitatea nominală, dar cel puțin o dată, la 3 luni, bateria trebuie încărcată normal;

— dacă în decursul a trei sau mai multor luni acumulatorii s-au descărcat cu mai puțin de 50% din capacitatea nominală, bateria va fi descărcată la regimul de 10 h, până la tensiunea de 1,93 V pe element și apoi reîncărcată.

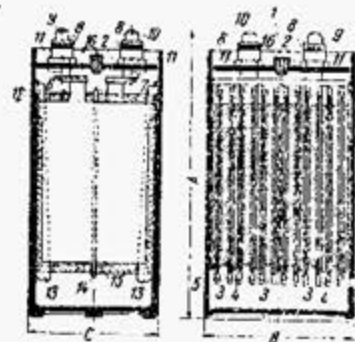


Fig. 69. — Elementul tip GO39:

1 — vas de ebonită; 2 — capac de ebonită; 3 — placă pozitivă de mare suprafață; 4 — placă negativă sac, pastată, de mijloc (1/1); 5 — placă negativă sac, pastată, de margine (1/2); 6 — puncte de asamblare a plăcilor negative; 7 — puncte de asamblare a plăcilor pozitive; 8 — legătură de cupru plumbuit, între elemente cu salbe; 9 — bornă pozitivă; 10 — bornă negativă; 11 — inel de cauciuc pentru fixarea capacului; 12 — piesă de ebonită în U pentru susținerea plăcilor pozitive; 13 și 14 — bețișoare de ebonită, izolație și întărire a planșetei de lemn; 15 — planșetă de lemn, netedă; 16 — dop de cauciuc.

96. Acumulatori pentru tracțiune și iluminatul trenurilor se execută conform STAS nr. 445-52.

a) Acumulatorii cu plăcile pozitive de mare suprafață și plăcile negative sac (fig. 69, 70, și 71) sînt de 3 tipuri simbolizate prin:

GO 39, J 100 și ZO 50

în care numerele indică suprafața utilă în dm^2 a plăcii pozitive.

Utilizează ca electrolit acidul sulfuric diluat. Capacitatea specifică (Ah/kg de placă) este mică, greutatea mare și viața lungă. Pot fi descărcate la regimuri cuprinse între 1...10 h.

b) Acumulatorii cu plăcile pozitive și negative grătare, cu oxizi raportați (fig. 72) sînt de 4 tipuri, simbolizate prin:

Ky 210, Ky 225, Ky 285 și Ky 380,

în care numerele indică înălțimea utilă a plăcii, în mm.

Utilizează ca electrolit acidul sulfuric. Capacitatea specifică este mare, greutatea mică și viața scurtă. Pot fi descărcate la regimuri cuprinse între 3...5 h.

Caracteristicile principale ale acestor acumulatori sînt date în tabelele 40—45.

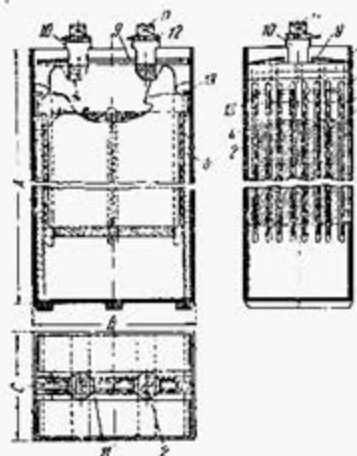


Fig. 70. — Elementul tip J 100:

1 — vas de ebonită; 2 — placă pozitivă de mare suprafață; 3 — placă negativă sac, pastată, de mijloc (1/1); 4 — placă negativă sac, pastată, de margine (1/2); 5 și 6 — bețișoare de ebonită, izolație și întărire a planșetei de lemn; 7 — planșetă de lemn, netedă; 8 — cap de ebonită sau sticlă; 10 — bornă; 11 — șuruburi borne; 12 — salbă; 13 — piesă U de ebonită.

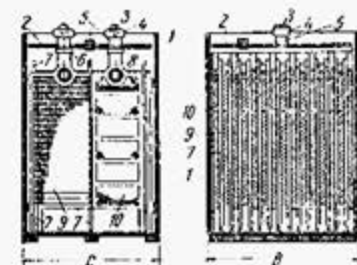


Fig. 71. — Elementul ZO 50 pentru iluminatul trenurilor:

1 — vas de ebonită; 2 — capac de ebonită; 3 — cablu de cupru, constituind legătura între elemente; 4 — papuc de cablu, sudat de bornă; 5 — bornă; 6 — gît suport al capacului; 7 — tub de sticlă, izolație între plăci; 8 — tub de sticlă, suport al plăcilor; 9 — placă pozitivă de mare suprafață; 10 — placă negativă sac, pastată.

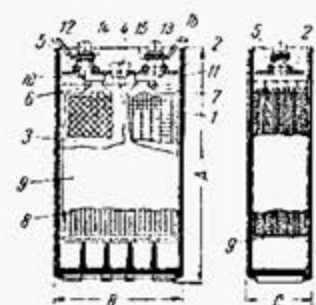


Fig. 72. — Element tip Ky:

1 — vas de ebonită; 2 — capac de ebonită; 3 — izolație între plăci; decelul perforat; 4 — dop de cauciuc; 5 — inel de cauciuc pentru elanșare; 6 — placă pozitivă grătare și oxizi raportați; 7 — placă negativă de mijloc (1/1) grătare și oxizi raportați; 8 — placă negativă de margine (1/2), cu grătare și oxizi raportați; 9 — izolație între plăci; planșete de lemn netede; 10 — puncte de asamblare a plăcilor pozitive; 11 — puncte de asamblare a plăcilor negative; 12 — șurub de fixare a legăturilor între elemente, la borna pozitivă; 13 — șurub de fixare a legăturilor între elemente la borna negativă; 14 și 15 — salbe de legătură între elemente; 16 — legături între elemente, din cupru plumbuit.

Tabela 40. Dimensiunile exterioare ale cutiei de ebonită, numărul plăcilor și greutatea unui element la acumulatori cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Tipul acumulatorului	Numărul plăcilor			Dimensiunile exterioare ale cutiei de ebonită mm			Greutatea unui element umplut și încălzit kg
	Positive	Negative		Înălțime A	Lățime B	Lungime C	
		1/1	1/2				
I GO 39	1	—	2	305	148	35	4,3
II GO 39	2	1	2	305	148	61	8,3
III GO 39	3	2	2	305	148	87	12,3
IV GO 39	4	3	2	305	149	114	16,2
V GO 39	5	4	2	305	149	140	19,9
VI GO 39	6	5	2	305	149	166	24,1
VII GO 39	7	6	2	305	150	193	27,8
VIII GO 39	8	7	2	305	150	219	31,6
IX GO 39	9	8	2	305	150	245	35,8
X GO 39	10	9	2	305	151	272	39,5
I J 100	1	—	2	535	205	41	14,1
II J 100	2	1	2	535	206	74	27,0
III J 100	3	2	2	535	206	106	37,5
IV J 100	4	3	2	535	206	138	49,0
V J 100	5	4	2	535	207	171	60,7
VI J 100	6	5	2	535	207	203	73,7
VII J 100	7	6	2	535	207	235	81,9
VIII J 100	8	7	2	535	208	268	98,1
IX J 100	9	8	2	535	208	300	109,3
X J 100	10	9	2	535	208	332	121,0
VII ZO 50	7	6	2	305	194	219	—
II Ky 210	2	1	2	310	148	36	4,40
III Ky 210	3	2	2	320	148	51	6,40
IV Ky 210	4	3	2	320	148	66	8,20
V Ky 210	5	4	2	320	148	81	10,10
VI Ky 210	6	5	2	320	148	96	12,00
VII Ky 210	7	6	2	330	149	112	13,90
VIII Ky 210	8	7	2	330	149	127	15,80
IX Ky 210	9	8	2	330	149	142	17,70
X Ky 210	10	9	2	330	149	157	19,50
II Ky 225	2	1	2	325	196	36	6,2
III Ky 225	3	2	2	335	196	51	8,9
IV Ky 225	4	3	2	335	196	66	11,6
V Ky 225	5	4	2	335	196	81	14,2
VI Ky 225	6	5	2	335	196	96	16,8
VII Ky 225	7	6	2	345	197	112	19,6
VIII Ky 225	8	7	2	345	197	127	22,3
IX Ky 225	9	8	2	345	197	142	25,0
X Ky 225	10	9	2	345	197	157	27,8
II Ky 285	2	1	2	390	198	36	7,6
III Ky 285	3	2	2	400	198	51	11,0
IV Ky 285	4	3	2	400	198	66	14,3
V Ky 285	5	4	2	400	198	81	17,5
VI Ky 285	6	5	2	400	198	96	20,8
VII Ky 285	7	6	2	410	197	112	24,2
VIII Ky 285	8	7	2	410	197	127	27,8
IX Ky 285	9	8	2	410	197	142	31,0
X Ky 285	10	9	2	410	197	157	34,3
VI Ky 380	6	5	2	540	199	109	—
VI Ky 380	11	10	2	540	199	170	—

Tabela 41. Intensitatea maximă a curentului de încălzire și descărcare la acumulatori cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Tipul acumulatorului	Regimurile de descărcare, în h										Intensitatea maximă a curentului de descărcare A
	1		2		3		5		10		
	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	
I GO 39	14,5	14,5	18	9	21	7	23,5	4,7	28,5	2,9	7
II GO 39	29	29	36	18	42	14	47	9,4	57	5,7	14
III GO 39	43	43	54	27	63	21	70	14	85	8,5	21
IV GO 39	58	58	72	36	84	28	94	19	114	11,5	29
V GO 39	72	72	90	45	105	35	117	23	142	14	35
VI GO 39	87	87	108	54	126	42	140	28	171	17	42
VII GO 39	101	101	126	63	147	49	164	33	199	20	49
VIII GO 39	115	115	144	72	168	56	187	37,5	228	23	56
IX GO 39	130	130	161	80,5	190	63	211	42	256	25,5	63
X GO 39	144	144	179	89	211	70	234	47	285	28,5	70
I J 100	37	37	46	23	54	18	60	12	73	7,5	18
II J 100	74	74	92	46	103	36	120	24	145	14,5	36
III J 100	111	111	138	69	162	54	180	36	218	22	54
IV J 100	148	148	184	92	216	72	240	48	290	29	72
V J 100	185	185	230	115	270	90	300	60	363	36,5	90
VI J 100	222	222	276	139	324	108	360	72	435	43,5	108
VII J 100	259	259	322	161	378	126	420	84	503	51	126
VIII J 100	296	296	368	184	432	144	480	96	580	58	144
IX J 100	333	333	414	207	486	162	540	108	633	65	162
X J 100	370	370	460	230	540	180	600	120	725	73	180
VII ZO 50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	222	22,5
II Ky 210	—	—	—	—	48	16	53	11	—	—	11
III Ky 210	—	—	—	—	72	24	80	16	—	—	16
IV Ky 210	—	—	—	—	96	32	108	21	—	—	21
V Ky 210	—	—	—	—	120	40	132	26	—	—	26
VI Ky 210	—	—	—	—	144	48	160	32	—	—	32
VII Ky 210	—	—	—	—	168	56	186	37	—	—	37
VIII Ky 210	—	—	—	—	192	64	212	42	—	—	42
IX Ky 210	—	—	—	—	216	72	240	48	—	—	48
X Ky 210	—	—	—	—	240	80	265	53	—	—	53
II Ky 225	—	—	—	—	72	24	80	16	—	—	16
III Ky 225	—	—	—	—	108	36	120	24	—	—	24
IV Ky 225	—	—	—	—	144	48	160	32	—	—	32
V Ky 225	—	—	—	—	180	60	200	40	—	—	40
VI Ky 225	—	—	—	—	216	72	240	48	—	—	48
VII Ky 225	—	—	—	—	252	84	280	56	—	—	56
VIII Ky 225	—	—	—	—	288	96	320	64	—	—	64
IX Ky 225	—	—	—	—	324	108	360	72	—	—	72
X Ky 225	—	—	—	—	360	120	400	80	—	—	80
II Ky 285	—	—	—	—	90	30	100	20	—	—	20
III Ky 285	—	—	—	—	135	45	150	30	—	—	30
IV Ky 285	—	—	—	—	180	60	200	40	—	—	40
V Ky 285	—	—	—	—	225	75	250	50	—	—	50
VI Ky 285	—	—	—	—	270	90	300	60	—	—	60
VII Ky 285	—	—	—	—	315	105	350	70	—	—	70
VIII Ky 285	—	—	—	—	360	120	400	80	—	—	80
IX Ky 285	—	—	—	—	405	135	450	90	—	—	90
X Ky 285	—	—	—	—	450	150	500	100	—	—	100
VI Ky 380	—	—	—	—	—	—	408	—	—	—	—
XI Ky 380	—	—	—	—	—	—	748	—	—	—	—

Observații. — C reprezintă capacitatea la 25°C, în Ah; I — intensitatea maximă a curentului de descărcare, în A.

Tabela 42. Dimensiunile și greutatea plăcilor la acumulatorii cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Tipul acumulatorului	Placa	Greutatea medie, kg	Dimensiunile plăcilor fără urechi, mm		
			Înălțime	Lățime	Grosime
GO 39	Positivă	1,71	188	120	10,5
	Negativă mijloc	0,86	195	125	5,5
	Negativă margine	0,69	195	125	4,75
J 100	Positivă	4,13	344	168	10,5
	Negativă mijloc	2,48	344	168	8
	Negativă margine	1,80	344	168	5
ZO 50	Positivă	2,04	190	161	8
	Negativă mijloc	1,3	192	165	7,5
	Negativă margine	0,98	192	165	4,5
Ky 210	Positivă	0,63	210	136	42
	Negativă mijloc	0,59	210	136	42
	Negativă margine	0,43	210	131	28
Ky 225	Positivă	0,94	225	180	42
	Negativă mijloc	0,85	225	180	42
	Negativă margine	0,58	225	175	28
Ky 285	Positivă	1,13	285	180	42
	Negativă mijloc	1,00	285	180	42
	Negativă margine	0,68	285	185	28
Ky 380	Positivă	1,58	380	180	42
	Negativă mijloc	1,19	380	180	42
	Negativă margine	0,98	380	175	28

Tabela 43. Tensiunea minimă pe element la acumulatorii cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Tipul acumulatorului	Tensiunea pe element, în V				
	Regimul de descărcare, în h				
	1	2	3	5	10
GO 39	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8
J 100	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8
ZO 50	—	—	—	—	1,8
Ky	—	—	1,68	1,7	—

Observații. — Descărcarea trebuie întreruptă când tensiunea ebie a unui singur element din baterie scade sub valorile indicate în tabelă.

Tensiunea la sfârșitul încărcării: 2,5–2,75 V pe element.

Tabela 44. Randamentul acumulatorilor cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Tipul acumulatorului	Regimul de descărcare, în h					
	3	5	10	3	5	10
	Randament în cantitate de electricitate			Randament în energie		
GO 39	84%	84%	84%	65%	65%	65%
J 1000	84%	84%	84%	65%	65%	65%
ZO 50	—	—	84%	—	—	65%
Ky	84%	84%	—	65%	65%	—

Tabela 45. Autodescărcarea în circuit deschis la acumulatorii cu plăci de plumb pentru tracțiune și iluminatul trenurilor

Durata inactivității acumulatorului exprimată în zile (a 24 h)	Pierdere admisibilă în procente, din capacitate, la regimul de 10 h	Pierdere medie admisibilă pe zi (a 24 h) în procente din capacitate, la regimul de 10 h
30	30	1
15	21	1,1
6	10,2	1,7
3	5,4	1,8

Observație. — În timpul inactivității acumulatorului, pierderile nu trebuie să depășească valoarea maximă admisibilă indicată în tabelă.

II. MUTATOARE

A. Generalități

1. **Definiții și clasificare.** În sensul cel mai larg, prin *mutator* se înțelege un dispozitiv care transformă energia electrică de o formă, în energie electrică de altă formă, fără ca în procesul intern al acestei transformări să intervină o fază intermediară de transformare în energie de altă natură (mecanică, chimică etc.).

Forma energiei (puterii) electrice într-un circuit se caracterizează, în sensul definiției de mai sus, prin forma variațiilor în timp ale tensiunii și curentului, al căror element fundamental este frecvența.

Se numește *redresor*, mutatorul care transformă energia electrică de curent alternativ de o frecvență oarecare f (de obicei joasă sau medie), în energie electrică de curent continuu ($f = 0$).

Se numește *invertor*, mutatorul care transformă energia electrică de curent continuu ($f = 0$) în energie electrică de curent alternativ (f oarecare), intervenind în procesul de transformare printr-o acțiune de *control sau comandă discontinuă*.

Se numește *oscilator*, mutatorul care efectuează aceeași transformare ca și inverterul, cu deosebirea că intervine în procesul de transformare printr-o acțiune de *control sau comandă continuă*.

Redresorul, inverterul și oscilatorul constituie tipurile fundamentale de mutatoare. Combinând funcțiunile acestora, se pot realiza transformări din curent continuu în curent continuu sau din curent alternativ în curent alternativ. În primul caz se folosește un inverter urmat de un redresor, în al doilea caz se folosește un redresor urmat de un inverter. În ambele cazuri se produce o transformare dublă și mutatorul se numește cu *conversiune dublă*.

Transformarea curentului alternativ dintr-un sistem de o anumită tensiune și frecvență și un anumit număr de faze, în alt sistem cu altă tensiune și frecvență și alt număr de faze se poate realiza și printr-un proces direct, într-un mutator cu *conversiune simplă*.

Se numește *cicloconverter*, mutatorul care transformă energia de curent alternativ, dintr-un sistem I de frecvență f_1 în energie de curent alternativ, într-un sistem II de frecvență f_2 și invers, fără a se folosi o fază intermediară de curent continuu.

Se numește *cicloreducer*, mutatorul care permite trecerea energiei numai de la sistemul I la II, ($f_1 > f_2$).

Se numește *cicloinverto*, mutatorul care permite trecerea energiei numai de la sistemul II la I ($f_2 < f_1$).

Uneori, poate fi necesar să se realizeze o transformare din curent alternativ în curent alternativ de la o frecvență f_1 la o frecvență f_2 , printr-o conversiune dublă, faza intermediară fiind însă de curent alternativ de o frecvență f_3 ($f_1 > f_3 < f_2$).

Pentru aceasta se folosește un cicloreducer la transformarea $f_1 \rightarrow f_3$ și un cicloinverto la transformarea $f_3 \rightarrow f_2$.

Potrivit sensului general dat termenului mutator în definiția de mai înainte, prin mutator se înțelege de fapt o instalație mai mult sau mai puțin complexă, care efectuează transformările arătate. În orice instalație de acest fel există însă

un element fundamental, ale cărui proprietăți fac posibilă transformarea energiei electrice dintr-o formă într-alta. Acesta este *elementul redresor*. Uneori, se folosește tot numele de mutator, în sens mai restrictiv, în loc de element redresor.

Se numește *element redresor* un dispozitiv cu două borne care permite trecerea curentului electric într-un singur sens, în circuitul în care se intercalează.

Un element redresor *ideal* prezintă o rezistență nulă la trecerea curentului într-un anumit sens și o rezistență infinită la trecerea curentului în sensul invers. Un element redresor *real* prezintă într-un sens o rezistență mică neliniară (variabilă cu curentul) și în sensul invers o rezistență neliniară foarte mare. În marea majoritate a cazurilor, elementele redresoare sînt dispozitive statice.

2. **Tipuri de elemente redresoare.** În electrotehnică se utilizează următoarele tipuri de elemente redresoare sau de mutatoare (în sens restrictiv):

- diode termoionice cu vid înaintat (kenotroane);
- diode termoionice cu gaz (gazotroane);
- triode termoionice cu gaz (tiratroane);
- tuburi redresoare cu arc de mercur (cu baie de mercur);
- elemente redresoare uscate (sau cu strat de baraj);
- elemente redresoare cu contacte mobile;
- elemente redresoare chimice (celule electrolitice);
- elemente redresoare cu electrozii în gaze sub presiune.

Proprietățile fizice și caracteristicile tehnice ale acestor elemente redresoare se vor descrie în cuprinsul acestui capitol.

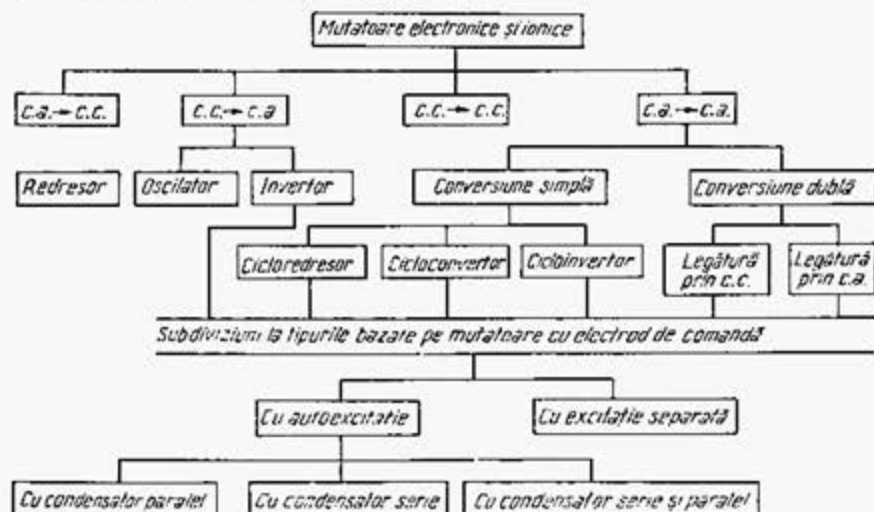


Fig. 1. — Clasificarea generală a mutatoarelor.

Cea mai largă utilizare o au primele patru tipuri de elemente redresoare, care se pot grupa sub numele de *mutatoare electronice și ionice*, deoarece conducția curentului prin elementul redresor se face prin electroni și ioni, în vid sau gaze la presiune foarte redusă.

În fig. 1 se arată o clasificare generală a mutatoarelor electronice și ionice. Toate funcțiunile arătate în această tabelă sinoptică, afară de funcția de redresare, necesită *elemente redresoare cu electrod de comandă*.

După cum se va vedea la subcapitolele D și F, această proprietate se găsește la elementele redresoare de tipul *c* și la majoritatea celor de tipul *d*.

Elementele redresoare de tipul *a, b, c, f, g* și *h* nu pot fi folosite decît în funcția de redresare.

În acest capitol se vor descrie numai redresoarele; celelalte aplicații arătate în tabela din fig. 1 se vor descrie în volumul de *Electronică Industrială* al acestui Manual.

În oscilator, elementul redresor este constituit de obicei dintr-o triodă termoionică cu vid înaintat, care permite un reglaj continuu al curentului în funcție de tensiunea aplicată unei grile de comandă, spre deosebire de trioda termoionică cu gaz, utilizată la invertor, în care grila de comandă poate influența doar momentul de apariție a curentului și deci exercită un control sau o comandă discontinuă.

MUTATOARE IONICE ȘI ELECTRONICE

B. Dioda cu vid înaintat (kenotroane)

3. **Descriere generală.** Dioda termoionică cu vid înaintat este un tub electronic relativ simplu, dar important. Ea se compune din doi electrozi — un anod și un catod — după cum arată simbolul din fig. 2a. Electrozii sînt plasați într-un balon de sticlă în care s-a făcut vidul cel mai bun posibil, cu scopul ca efectul urmelor de gaz să fie neglijabil în funcționarea tubului.

Unul dintre electrozi, *catodul*, este încălzit la o temperatură ridicată pentru ca să se producă o emisie termoionică de electroni. Celălalt electrod, *anodul*, este relativ rece și are o temperatură puțin superioară temperaturii mediului ambiant.

O sursă de tensiune exterioară stabilește o diferență de potențial între anod și catod, deci un câmp electric în spațiul vidat dintre acești electrozi. Dacă în acest spațiu există electroni liberi emiși de catod, ei se vor deplasa sub efectul câmpului electric, de-a lungul liniilor de forță electrice și în sens invers sensului lor pozitiv. Deci electronii pot ajunge la anod, dacă acesta este la un potențial pozitiv față de catod.

4. **Emisia termoionică a electronilor.** Conductivitatea electrică a metalelor este rezultatul existenței electronilor liberi în structura intimă a metalului. Pentru ca acești electroni liberi să poată părăsi suprafața metalului, ei trebuie să execute un anumit lucru pentru a învinge forțele de atracție exercitate de nucleele diversilor atomi, cînd electronul încearcă să părăsească suprafața. Dacă energia cinetică a electronului liber din metal poate ajunge la un moment dat să depășească energia corespunzătoare acestui lucru, care reprezintă bariera de energie a suprafeței, electronul poate să părăsească metalul. Pentru toate substanțele cunoscute, energia necesară este atât de mare încît la temperatura ambiantă, electronii nu pot părăsi materialul, decît numai dacă primesc din afară o energie suplimentară, energie provenind din radiații incidente (lumină, raze X etc), sau particule cu viteză mare care lovesc suprafața. Dacă însă temperatura conductorului crește, energia cinetică a electronilor liberi din material crește și la o temperatură suficient de ridicată un număr apreciabil de electroni pot avea

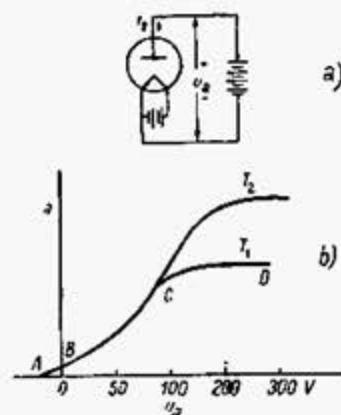


Fig. 2. — Caracteristicile statice ale diodei cu vid înaintat.

energia cinetică necesară pentru a învinge atracția exercitată de suprafața materialului. Se obține atunci o *emisie termolionică* de electroni.

α) *Travaliul de emisie.* Travaliul de emisie W_e este energia care trebuie furnizată unui electron liber pentru a-și ridica energia cinetică de la valoarea W_i , de la zero absolut, până la valoarea W_a necesară învingerii forțelor de atracție ale suprafeței. Travaliul de emisie depinde de natura materialului și de condițiile suprafeței (suprafața netedă sau aspră, curată sau cu impurități).

Datele experimentale pot varia foarte mult din cauza condițiilor în care se desfășoară experiența. Valorile indicate în tabela 1 se pot considera cele mai bune, cunoscute până în prezent.

Tabela 1. Valorile constantelor de emisie

Materialul	A_0 $A/m^2 \cdot ^\circ K^2$	b_0 $^\circ K$	W_e	Temperatura de topire, în $^\circ K$
Calciu	$60,2 \cdot 10^4$	26 000	2,24	
Cesiu	$162 \cdot 10^4$	21 000	1,81	299
Carbon	$60,2 \cdot 10^4$	50 300	4,34	
Molibden	$60,2 \cdot 10^4$	50 900	4,38	2896
Nichel	$20,8 \cdot 10^4$	32 100	2,77	1725
Copru	$65 \cdot 10^4$	50 200	4,23	1356
Tantal	$60,2 \cdot 10^4$	47 200	4,07	3300
Thoriu	$60,2 \cdot 10^4$	38 900	3,35	2118
Wolfram	$60,2 \cdot 10^4$	52 400	4,52	3655
Wolfram thoriat	$9 \cdot 10^4$	30 500	2,63	

β) *Ecuatia emisiei electronice.* Procesul emisiei electronice de la un corp solid este foarte asemănător cu procesul de evaporare de la suprafața unui lichid. În cazul vaporilor, moleculele evaporate sînt moleculele care au obținut o energie cinetică suficientă pentru a învinge forțele de coeziune de la suprafața lichidului, iar numărul lor crește repede cu temperatura. Emisia termolionică de electroni de la corpuri calde reprezintă în fond un proces similar și se poate considera ca o evaporare de electroni în care energia electronului necesară învingerii forțelor de atracție de la suprafață corespunde cu căldura latentă de vaporizare a unui lichid.

Densitatea curentului de emisie este dată de ecuația emisiei termolionice:

$$J_e = A_0 T^2 e^{-\frac{W_e + Q_e}{kT}} = A_0 T^2 e^{-\frac{b_0}{T}}, \quad (4.1)$$

în care: J_e este densitatea curentului de emisie, în A/m^2 de suprafață a catodului;
 T — temperatura catodului, în $^\circ K$;

$$A_0 = \frac{4\pi m_e Q_e k^2}{h^2} \text{ — o constantă de proporționalitate (A/m}^2 \cdot ^\circ K^2\text{);}$$

$$b_0 = \frac{Q_e W_e}{k} = 11 600 W_e, \text{ în } ^\circ K;$$

W_e — travaliul de emisie;

Q_e — sarcina electronului, în C;

m_e — masa electronului, în kg;

h — constanta lui Plank;

k — constanta lui Boltzmann.

Ecuatia emisiei termolionice a electronilor a fost stabilită de Dushman în 1923. Deoarece factorul de la exponent este foarte mare, este greu să se determine pe cale experimentală dacă exponentul lui T este $\frac{1}{2}$ sau 2; totuși ecuația lui Dushman

este acceptată astăzi în general ca avînd baza teoretică cea mai bună.

Factorul A_0 ar trebui, după teorie, să fie o constantă universală pentru toate materialele și să aibă valoarea $120,4 \cdot 10^4 A/m^2 \cdot ^\circ K^2$.

În realitate, valoarea lui A_0 determinată pe cale experimentală variază în limite foarte mari.

Ecuatia emisiei termolionice a electronilor se mai poate scrie sub forma:

$$\lg \frac{J}{T^2} = \lg A_0 - \frac{0,4343 b_0}{T}. \quad (4.2)$$

În fig. 3 se arată variația curentului emis de un catod cald, în funcție de temperatură, după ecuația lui Dushman.

γ) *Energia medie a electronilor emiși.* Electronii emiși au o energie cinetică sau o viteză inițială după ce au părăsit suprafața metalului. Aceste viteze inițiale sînt diferite de la electron la electron.

Energia medie a electronilor emiși se poate arăta că este dată de relația:

$$Q_e \cdot V = 2kT, \quad (4.3)$$

iar energia medie exprimată în electron-volți este:

$$\frac{2kT}{Q_e}. \quad (4.4)$$

Pentru wolfram încălzit la $2800^\circ K$, această energie medie este 0,48 eV, iar la punctul de topire al wolframului atinge abia 0,63 eV. Se vede că electronii emiși au viteze inițiale cu o valoare medie destul de mică față de vitezele pe care le dobîndesc electronii în mișcarea lor prin tubul electronic, sub efectul cîmpurilor electrice.

δ) *Materialul și construcția catodului.* Electroful la care se produce emisia termolionică se numește catod, deoarece este electroful negativ în circuitul curentului emis. În cazul emisiei termolionice, catodii se împart în două categorii:

— catodzi cu încălzire directă de forma unui filament și cu suprafața neechipotențială, și

— catodzi cu încălzire indirectă, avînd o suprafață echipotențială.

La catodzi cu încălzire directă se folosește un fir care se încălzește prin trecerea curentului electric, iar emisia electronică se produce direct de la acest filament (a din fig. 4). Deoarece curentul de încălzire curge direct prin filament, se produce o cădere de tensiune uniform distribuită de-a lungul firului, deci suprafața catodului nu se află la același potențial.

În cazul catozilor cu încălzire indirectă (b din fig. 4), se folosește un filament răsucit din wolfram, acoperit cu un material izolant refractar peste care se trece un cilindru subțire, de obicei din nichel. Exteriorul acestui cilindru este învelit cu un strat care emite electroni.

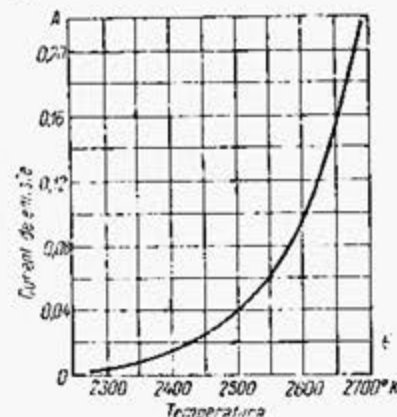


Fig. 3 — Curentul de emisie termolionic în funcție de temperatură pentru un filament de wolfram.

Trecerea curentului prin filamentul de wolfram încălzeşte cilindru la temperatura necesară emisiei termoionice. Deoarece curentul emis este de obicei destul de mic, iar prin cilindru nu curge curentul de încălzire, suprafaţa cilindrică este echipotenţială.

O altă formă de construcţie a unui catod echipotenţial este catodul cu ecran termic arătat în fig. 4c, care se utilizează însă la tuburile cu gaze şi se va descrie în § 16. Materialele care se folosesc la construcţia filamentelor de emisie termoionică sînt destul de puţine. Calităţile pe care trebuie să le îndeplinească sînt: lucru de emisie mic, proprietăţi mecanice bune la temperaturi înalte şi un punct de topire ridicat.

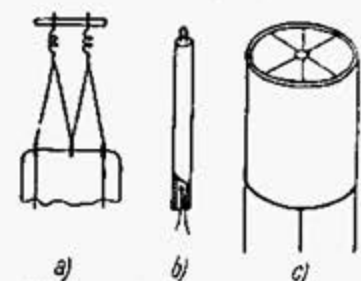


Fig. 4. - Construcţia catodilor: a - catod cu încălzire directă, filamentul, cu suprafaţa neechipotenţială; b - catod cu încălzire indirectă, cu suprafaţa echipotenţială; c - catod cu încălzire indirectă şi ecran de căldură.

Wolframul, deşi are un lucru de emisie de 4,52 eV, se utilizează ca material emisiv, din cauza punctului său de topire extrem de ridicat 3 655°K. Aceasta permite ca filamentele de wolfram să funcţioneze la o temperatură de 2 500–2 600°K, fără să se producă o evaporare exagerată de wolfram, care ar micşora secţiunea firului. Proprietatea de emisie a wolframului scade dacă el absoarbe pe suprafaţa sa un strat subţire de oxigen, sau de alte gaze; de aceea, el trebuie situat într-un spaţiu cu vid înalt. La funcţionarea în atmosferă de gaze inerte nu se produce acest fenomen. Vidul

înalt este totuşi necesar în tuburile electronice pentru a permite electronilor o mişcare nestingherită. Wolframul fiind rezistent la bombardamentul ioniilor pozitivi este indicat în mod deosebi pentru filamentele tuburilor de înaltă tensiune. Randamentul său de emisie este mic 2–10 mA/W.

Wolframul thoriat care conţine 1–2% oxid de thoriu are caracteristici de emisie mult ameliorate. Aceasta se datoreşte unui strat de thoriu monoatomic care se formează la suprafaţa wolframului şi care are proprietatea de a reduce travaliul de emisie.

Dacă un astfel de filament se încălzeşte la o temperatură de 1 800 – 2 000°K, se obţine o emisie foarte bogată.

Filamentele de wolfram thoriat nu se folosesc de obicei la tuburi care trebuie să funcţioneze cu tensiuni mai mari decât 3 500 – 4 000 V.

Randamentul de emisie al filamentelor cu wolfram thoriat este de aproape 50 – 100 mA/W.

Materiale din oxizi. Unii din oxizii pământurilor rare au o emisie foarte bogată la temperaturi relativ scăzute. Se utilizează catodi cu încălzire indirectă avînd suprafaţa acoperită cu astfel de oxizi. Cilindru de bază este format din nichel, konel sau platină, iar stratul este de obicei din oxizi de stronţiu sau de bariu. Deoarece oxizii acestor elemente sînt instabili în aer, la fabricarea catodilor de acest fel, se acoperă catodul mai întîi cu carbonaţi sau nitraţi de bariu sau de stronţiu. După ce se face vidul în tub, catodii se încălzesc la o temperatură superioară temperaturii normale de funcţionare, straturile de carbonat se reduc în oxizi, iar gazele care rezultă sînt evacuate în timpul efectuării vidului. Apoi, cînd o tensiune anodică în acest timp, se produce curentul de emisie de la catod şi emisia termoionică ajunge treptat la valoarea sa normală. Această operaţie se numeşte activarea catodului.

Straturile de oxizi pierd foarte mult din calităţile emiţătoare dacă există în tub urme de oxigen. De asemenea, ele se pot distruge foarte uşor în urma unui

bombardament cu ioni pozitivi. Din acest motiv utilizarea catodilor din oxizi se limitează la tuburi cu tensiuni anodice mai mici de 500 V.

Din cauza randamentului de emisie foarte bun al acestor materiale, peste 95% din tuburile electronice folosesc astăzi catodi din oxizi. Temperatura de funcţionare a acestor catodi este de 1 000 – 1 250°K şi randamentul de emisie, de 100 – 1 000 mA/W. În tabela 2 sînt date principalele caracteristici ale materialelor pentru catodi.

Tabela 2. Caracteristicile materialelor pentru catodi

Materialul	A_e A/m ² ·°K ²	W_e eV	Randamentul de emisie mA/W	Temperatura de funcţionare °K
Wolfram	$60,2 \cdot 10^4$	4,52	2–10	2 500–2 600
Wolfram thoriat	$3,0 \cdot 10^4$	2,63	50–100	1 800–2 000
Oxizi	$0,01 \cdot 10^4$	1,70	100–1 000	1 000–1 250

*) Aceste mărimi sînt foarte variabile

e) *Efectul Schottky* (v. şi vol. I, cap. III, § 153). Cînd pe anodul unui tub electronic, se aplică un potenţial, se produce un cîmp electric, care, fiind îndreptat de la anod la catod, accelerează electronii emişi de catod, în drumul lor spre anod. Efectul acestui cîmp se face simţit şi asupra electronilor de la suprafaţa catodului. Electronii, mişcîndu-se în cîmpul electric, dobîndesc o energie cinetică, care se adaugă la energia cinetică cîştigată prin încălzirea catodului. În modul acesta, energia necesară ce se dă electrodului prin încălzire pentru a se produce emisia electronului este mai mică decît travaliul de emisie W_e arătat mai sus. Teoria arată că rezultă un nou travaliu de emisie:

$$W'_e = W_e - \frac{Q_e^{1/2} E^{1/2}}{2 \pi \epsilon_0} \quad (4.5)$$

Cu cît cîmpul de accelerare E este mai mare, cu atît scade travaliul de emisie necesar. Acesta este efectul Schottky.

Din cauza acestui efect, curentul de saturaţie nu este riguros egal cu curentul de emisie dat de ecuaţia lui Dushman, ci puţin mai mare, fiind o funcţie şi de cîmpul electric de la suprafaţa catodului.

5. *Acţiunea de redresare a diodei*. Comportarea diodei cu vid înalt ca element redresor se poate descrie pe scurt în modul următor: din cauza emisiei termoionice care rezultă din încălzirea catodului la o temperatură ridicată şi din cauza distanţei mici dintre catod şi anod, curentul electric poate trece prin tub, cu o cădere de tensiune relativ mică, cu condiţia ca anodul să fie la un potenţial pozitiv în raport cu catodul. Pe de altă parte, dacă electrodului încălzit i se aplică un potenţial pozitiv faţă de anod, curentul care poate trece prin tub este cu totul neglijabil la tensiuni relativ mici, deoarece de la anodul rece nu se emit electroni, iar vidul înalt este un bun izolator. Astfel, tubul are o conductivitate unidirecţională¹⁾: dacă se aplică o sursă de curent alternativ în serie cu o diodă şi o sarcină electrică oarecare, de exemplu o rezistenţă, conducţia curentului are loc numai într-un singur sens în timpul alternanţei pozitive a tensiunii sursei, iar în alternanţa negativă, curentul este nul. În aceste condiţii, sursa de tensiune alternativă

¹⁾ Deoarece un vid perfect nu se poate obţine, la tensiuni mari (tubul poate fi „străpuns”, adică poate să treacă un curent şi în sens invers.

trimite prin sarcină un curent unidirecțional, pulsator. Tubul se comportă ca un redresor. Din cauza căderii de tensiune, care se produce pe tub în timpul conducției curentului, se pierde o putere în tub care se transformă în căldură.

Această pierdere de putere este adesea supărătoare, deoarece ea produce atât scăderea randamentului cu care puterea se transferă de la sursă la sarcină, cât și încălzirea anodului tubului. Pentru a determina puterea și alte diferite mărimi care intervin în fenomenul de redresare, este necesar să se cunoască curba tensiune-curent a tubului, sau caracteristica statică a diodei. Această caracteristică arată relația dintre curentul electric care traversează tubul, sau curentul anodic i_a și diferența de potențial dintre anod și catod, sau tensiunea anodică u_a .

6. Determinarea experimentală a caracteristicii statice a diodei. Caracteristica statică a diodei este reprezentată de curba tensiune-curent din fig. 2b. Când se ridică experimental această curbă pentru o diodă având catodul încălzit la temperatura T_1 , se găsește că la tensiuni anodice mici, curentul care traversează tubul este foarte mic. Pe măsură ce tensiunea anodică crește, crește și curentul prin tub și atinge o valoare pentru o anumită valoare a tensiunii, după care, oricât ar crește tensiunea anodică, nu se poate obține decât o creștere neînsemnată a curentului. Dacă temperatura catodului se ridică la valoarea T_2 și se trasează experimental o nouă curbă, se constată că partea inferioară a acestei curbe este identică cu curba precedentă, determinată pentru temperatura T_1 , dar după ce s-a atins punctul de saturație corespunzător curbei T_1 se constată că noua curbă continuă să crească pînă cînd se atinge o nouă saturație.

Cotul de saturație este pronunțat numai la catodii de wolfram. La catodii de wolfram thoriati acesta este foarte puțin pronunțat, iar la cei din oxizi aproape că nu există.

În regiunea AB a curbei, existența curentului se explică prin viteza inițială a electronilor emiși. În regiunea BC curentul anodic este mai mic decât curentul de emisie al catodului din cauza sarcinii spațiale negative formată de electronii acumulați între catod și anod.

În regiunea CD sarcina spațială nu mai există, iar curentul continuă să crească din cauza efectului Schottky.

7. Câmpul electric la suprafața catodului.

Cînd electronii sînt emiși de un catod cald, mulți dintre ei posedă energii mai mari decît traviul de emisie și aceste energii în exces apar ca energie cinetică a electronului. Surplusul de energie este în medie de ordinul 1 eV sau mai puțin, astfel încît vitezele care rezultă sînt mici. Totuși, există unii electroni cu viteza nulă și alții cu viteze mult mai mari decît valoarea medie de mai sus. Deoarece electronii se află în spațiul liber și distanțele dintre ei sînt destul de mari, astfel încît acțiunea lor reciprocă este relativ slabă, ei se comportă ca moleculele unui gaz și, în consecință, distribuția vitezelor lor este aceeași ca pentru un gaz molecular. Unii electroni au viteze mari, alții au viteze mai mici, însă marea majoritate au viteze în jurul vitezei medii, astfel cum se arată în fig. 5.

Sarcina spațială negativă formată din electroni în continuă mișcare, reprezintă un rezervor

care alimentează anodul și este alimentat de catod. Ea creează un câmp electric de frînare la suprafața catodului. Densitatea ei și acest câmp scad cînd crește tensiunea anodică.

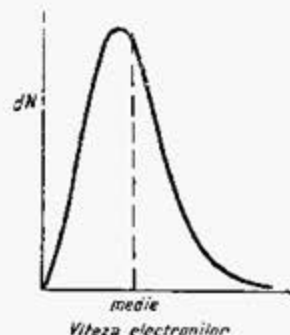


Fig. 5. — Distribuția maxwelliană a vitezelor electronilor emiși.

Dacă se presupune că anodul și catodul ar avea forma a două plăci plane paralele separate la o distanță d , distribuția potențialului în spațiul dintre ele s-ar reprezenta printr-o linie dreaptă 1 ca în fig. 6. Panta acestei linii reprezintă intensitatea câmpului electric. Dacă

placa din stînga, catodul sau placa negativă, se încălzește la o temperatură ridicată, ea începe să emită electroni care intră în spațiul anod-catod. Prezența electronilor negativi în spațiul dintre plăci face să scadă potențialul, astfel cum ne arată curba 2. Se vede că efectul concentrării electronilor în apropierea catodului este de a scădea potențialul la o valoare negativă, producînd prin aceasta un câmp electric negativ sau de respingere la suprafața catodului. Minimum de potențial se produce foarte aproape de suprafața catodului; regiunea respectivă se numește adesea *catod virtual*, deoarece în ce privește anodul, această regiune apare ca adevărată sursă a electronilor care merg spre anod.

Dacă tensiunea anodică crește, minimum de potențial se ridică, câmpul de respingere scade la suprafața catodului și curentul crește. Invers, dacă tensiunea anodică scade, minimum de potențial scade și curentul descreește.

8. Ecuația sarcinii spațiale. Densitatea curentului de electroni în cazul cînd există o sarcină spațială este dată de relația:

$$J_a = \frac{\epsilon_0}{2,25} \sqrt{\frac{2Q_e u_a^{3/2}}{m_e d^2}} \quad (8.1)$$

în care:

J_a — este densitatea curentului anodic, în A/m²;

Q_e — sarcina electronului $\cong 1,6 \cdot 10^{-19}$, în C;

m_e — masa electronului $\cong 9,1 \cdot 10^{-31}$, în kg;

u_a — tensiunea anodică, în V;

d — distanța dintre anod și catod, în m;

ϵ_0 — permitivitatea vidului $= \frac{10^{-9}}{36\pi}$, în F/m.

Înlocuind valorile constantelor, ecuația (8.1) devine:

$$J_a = 2,34 \cdot 10^{-6} \frac{u_a^{3/2}}{d^2} \quad (8.2)$$

Această expresie se cunoaște sub numele de *legea trei pe doi* sau *ecuația sarcinii spațiale*. Ea este riguros valabilă numai în cazul unor electrozi plani paraleli de dimensiuni foarte mari în raport cu distanța dintre ei.

Ecuația sarcinii spațiale arată că densitatea curentului variază invers cu pătratul distanței dintre electrozi. În consecință, pentru a evita necesitatea unei tensiuni anodice mari, distanța dintre anod și catod se face de obicei mică.

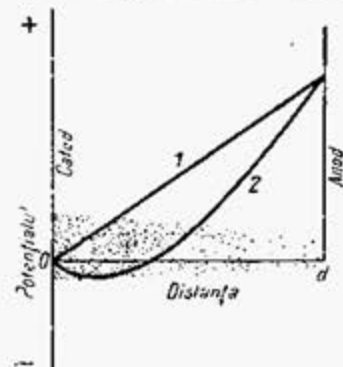


Fig. 6. — Variația potențialului și densității de electroni într-o diodă cu vid înaintat:

1 — fără sarcină spațială; 2 — cu sarcină spațială.

Densitatea curentului este proporțională cu puterea $3/2$ a tensiunii anodice; aceasta arată deci că o diodă cu vid, pe lângă faptul că are o conducție unilaterială, este un element neliniar cind conduce. Dioda în circuitele electrice nu ascultă deci de legea lui Ohm; de aceea, în aceste circuite nu se pot aplica teoremele generale ale rețelilor, stabilite pentru rețele liniare. Din acest motiv, s-au dezvoltat metode de analiză speciale, care în anumite ipoteze permit să se înlocuiască circuitul neliniar care conține diode printr-un circuit liniar. Expresia curentului anodic în situația existenței sarcinii spațiale, la o diodă cu electrozi cilindrici concentrici este:

$$i_a = 14,7 \cdot 10^{-6} \frac{u_a^{3/2}}{r_a l^2} \quad (8.3)$$

în care:

- i_a — este curentul anodic, în A;
- l — lungimea electrozilor cilindrici;
- r_a — raza anodului;
- u_a — tensiunea anodică, în V.

Factorul β^2 este o funcție de $\lg(r_a/r_k)$ (r_k fiind raza catodului), care rezultă din integrarea ecuațiilor diferențiale ale câmpului electric din diodă, în coordonate cilindrice. Valorile lui β s-au calculat pentru diferite rapoarte $\left(\frac{r_a}{r_k}\right)$. Dacă acest raport este mai mare decît 10, după cum este de obicei cazul, factorul β^2 se poate lua cu suficientă aproximație egal cu unitatea.

Tabela 3. Valoarea factorului β^2

r_a/r_k	β^2	r_a/r_k	β^2
1,00	0,000	20,00	1,072
2,00	0,279	30,00	1,091
3,00	0,517	50,00	1,094
5,00	0,767	70,00	1,088
7,00	0,887	100,00	1,078
10,00	0,978	∞	1,00

În tabela 3 s-au dat diferite valori pentru β^2 .

9. **Nepotriviri între datele teoretice și cele experimentale.** Cînd se ridică experimental caracteristicile diodelor, se constată că foarte puține tuburi au valorile factorului de proporționalitate β^2 sau ale exponentului lui u_a egale exact cu cele arătate în ecuația (8.3). Unul dintre cele mai importante motive pentru

aceste nepotriviri este că nici un tub nu se poate construi exact în conformitate cu ipotezele utilizate la deducerea ecuațiilor. Un tub nu poate avea electrozi nici plani paraleli infiniți, nici cilindrici de lungime infinită. Se produce inevitabil o împrăștiere a liniilor câmpului electric, iar din motive constructive, forma electrozilor este diferită de forma plană sau cilindrică. Pe de altă parte, prezența urmelor de gaz în interiorul tubului provoacă o deviere de la teorie, din cauza ciocnirilor dintre electroni și atomi și a ionizărilor care rezultă.

Din acest motiv, valorile exponentului lui u_a variază între 1,3 și 1,8. Aceasta nu infirmă teoria fundamentală și nici nu schimbă faptul fundamental că tubul cu vid este în esență un dispozitiv neliniar. În general, curentul printr-o diodă se poate scrie sub forma:

$$i_a = K n u_a^n \quad (9.1)$$

în care K și n pot varia de la tub la tub, dar valorile lor sînt în jurul valorilor teoretice.

10. **Puterea nominală a diodelor cu vid.** Valorile nominale ale unei diode, adică curentul anodic maxim și tensiunea anodică cu care ea trebuie să funcționeze

în mod normal depind de mai mulți factori. Curentul anodic este limitat de puterea de încălzire a catodului, de randamentul de emisie al catodului și de condițiile de durată ale tubului. Pe de altă parte încălzirea anodului sau a balonului de sticlă pot impune limite mai mici. La un curent anodic constant, puterea totală care se transformă în căldură în interiorul tubului este:

$$P = U_a I_a + U_f I_f \quad (10.1)$$

în care:

- U_a și I_a sînt valorile eficace ale tensiunii și curentului anodic;
- U_f și I_f — valorile eficace ale tensiunii și curentului filamentului de încălzire.

Această putere trebuie să părăsească tubul prin pereți și, din cauza absorbției de căldură în acești pereți, tubul se încălzește. Pentru a evita emanarea urmelor de gaz, incluse în material, pereții tubului nu trebuie să ajungă la o temperatură apropiată de aceea care a existat în timpul procesului de evacuare a resturilor de gaz din tub. Această temperatură este de obicei 350°C pentru sticlă moale sau 550°C pentru sticlă tare.

Adesea, proprietatea de a radia căldură a anodului este factorul care limitează datele nominale ale tubului. Anodul se încălzește din cauza a două procese: — Energia cinetică pe care o au electronii în momentul cînd ajung pe anod se transformă în căldură cînd electronii lovesc anodul.

— O parte din energia radiată de filament este interceptată de anod. Dacă diferența de potențial de contact dintre anod și catod și efectul de încălzire produs de traiul de emisie al anodului se neglijează, energia disipată de fiecare electron la sosirea pe anod este $Q_e u_a$ și puterea pe care electronii o cedează anodului este $U_a I_a$. Prin urmare, anodul trebuie să radieze o putere:

$$P_r = U_a I_a + f U_f I_f \quad (10.2)$$

în care f este un factor care arată în ce proporție puterea cheltuită la încălzirea catodului este interceptată de anod prin radiație. Factorul f are o valoare mai mică decît unitatea și depinde de măsura în care anodul înconjoară catodul. Temperatura care se stabilește pe un anod răcit prin radiație este dată cu aproximație de legea lui Stefan-Boltzmann:

$$P_r = s_p e_f K T^4 \quad (10.3)$$

în care:

- P_r este puterea radiată;
- s_p — suprafața de radiație;
- e_f — coeficientul total de emisie prin radiație;
- K — constanta lui Stefan-Boltzmann;
- T — temperatura suprafeței, în °K.

Pentru nichel, molibden și wolfram puterea disipată permisă este 3,5 și 8 W/cm², respectiv. La anozii din grafit care au un coeficient de radiație mai mare, se poate admite mai mult.

Tuburile de puteri disipate mai mari de 1 kW se construiesc de obicei cu anod răcit cu apă.

La tuburile cu vid înaintat folosite pentru redresarea tensiunilor înalte, tensiunea anodică nominală maximă și tensiunea inversă de vîrf determină

dimensiunile tubului prin cimpul electric care poate fi suportat de balonul izolat al tubului.

Cercetînd dimensiunile tuburilor utilizate în practică, se constată că ele sînt de obicei destul de lungi, astfel încît cimpul electric mediu la suprafața balonului de sticlă între firele de legătură nu depășește 3 000 V/cm. Pentru a putea rezista la tensiuni inverse de vîrf mai mari, tuburile redresoare se cufundă uneori în ulei și în modul acesta pericolul conturării este micșorat.

În tabela 4 sînt date caracteristicile kenotroanelor fabricate în U.R.S.S.

Tabela 4. Caracteristicile kenotroanelor fabricate în U.R.S.S.

Tipul	Specificare	Încălzire		Tensiune inversă maximă	Intensitatea maximă a curentului redresat de vîrf	Intensitatea maximă a curentului redresat mediu	Puterea maximă disipată de anod	Rezistența internă	Durata medie de serviciu
		Tensiune V	Curent A						
1 U 1	Kenotron de tensiune înaltă	0,7	0,18	10 000	1	—	—	—	—
2X2/879	Idem	2,5	1,75	12 500	100	7,5	—	—	—
5U4G	Kenotron cu doi anodi	5	3,0	1 550	675	225	—	—	—
5U4C	Idem	5	2,0	1 400	375	125	—	200	—
5Y3C	Idem	5,0	2,0	1 400	375	125	—	—	—
6X5C	Idem	6,3	0,6	1 250	210	70	—	—	—
30 0C	Kenotron dublu	30	0,3	—	250	90	—	—	—
BO-188	Kenotron cu doi anodi	4,0	2,05	1 300	500	155	—	100	—
B-360(230)	Kenotron	3,8	0,85	800	360	50	—	200	1 000
BO-239	Kenotron	4,0	2,05	1 800	—	180	—	—	—
B4-300	Kenotron de putere	11	3,5	4 000	200	—	50	2 500	200
B27-800	Idem	18	10,5	27 000	800	—	400	1 000	1 250
V-1 906	Kenotron de tensiune înaltă	4,0	2,5	4 000	—	—	—	400	500
VU-111	Idem	4,0	1,3	14 000	—	—	—	2 000	500
VU-504	Kenotron de putere	16,5	15,5	35 000	1 500	—	100	—	500
B35/1500-705A	Idem	5,0	5,0	35 000	1 250	100	60	—	—
8020	Idem	5,0	6,0	40 000	1 750	100	75	—	—

11. Caracteristica dinamică a diodei. Caracteristica statică a diodei, după cum s-a arătat, reprezintă relația dintre valorile instantanee $u_a - i_a$ ale tensiunii anodice și curentului anodic. Tensiunea anodică este identică cu tensiunea u a sursei de alimentare dacă în circuitul anodic (circuitul parcurs de curentul i_a) nu este intercalată nici o impedanță.

Dacă se intercalează o impedanță R în circuitul anodic, ca în fig. 7, curentul anodic i_a dezvoltă o putere în sarcina R și dioda are o funcționare «dinamică». Relația $i_a = f(u)$ se numește caracteristica dinamică a diodei și este diferită de relația $i_a = f(u_a)$ care reprezintă caracteristica statică.

Din fig. 7 se vede că:

$$u = u_a + Ri_a, \quad (11.1)$$

astfel încît caracteristica dinamică se poate obține din caracteristica statică, adău-

gînd pentru fiecare valoare i_a , un segment Ri_a la abscisa u_a a caracteristicii statice, astfel cum se arată în fig. 8.

Caracteristica dinamică a diodei se utilizează uneori pentru a determina pe cale grafică forma curentului anodic i_a , care în cazul schemei din fig. 7 este un curent redresat. În fig. 9 se arată această construcție grafică. I.a o tensiune de alimentare u pur sinusoidală, curentul redresat are forma unor pulsuri care se apropie, dar nu coincid, cu jumătăți de sinusoidă. Cu cît rezistența de sarcină R este mai mare, cu atît caracteristica dinamică este mai liniară și pulsurile de curent se apropie mai mult de forma sinusoidală.

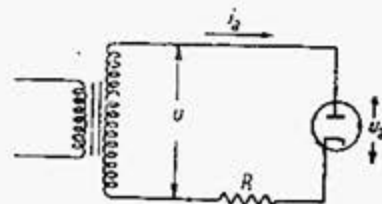


Fig. 7. Circuit simplu de redresare cu diodă.

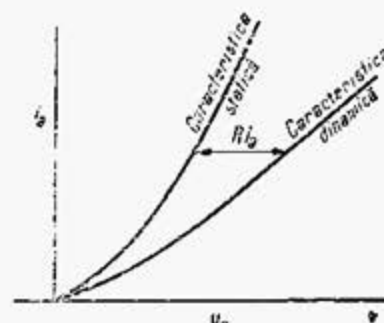


Fig. 8. — Caracteristica dinamică a diodei cu vid înaintat.

Dacă se consideră o caracteristică dinamică liniară, ca în fig. 10, pulsurile de curent sînt riguros jumătăți de sinusoidă, astfel încît construcția grafică nu mai este necesară, forma curentului obținându-se direct din calcul.

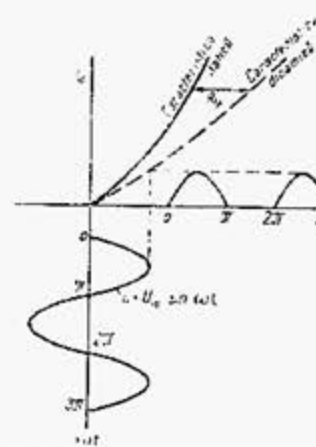


Fig. 9. — Determinarea grafică a formei de undă a curentului redresat.

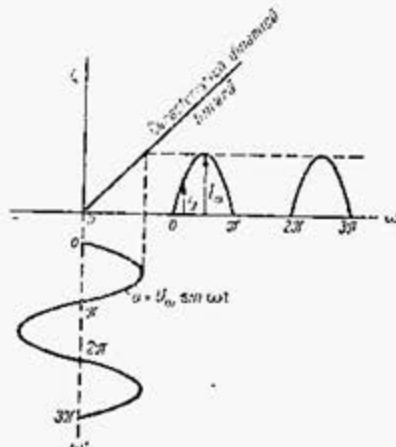


Fig. 10. — Utilizarea unei caracteristici liniare în locul caracteristicii dinamice.

Rezistența internă a diodei. Rezistența proprie zisă pe care dioda o prezintă la trecerea curentului i_a este:

$$R_d = \frac{u_a}{i_a}.$$

Această rezistență care se obișnuiește să se numească *rezistența în curent continuu* a diodei este cu atât mai mică, cu cât curentul i_a este mai mare, caracteristică fundamentală a proprietății de element nelinier.

În afară de această rezistență, se definește o *rezistență dinamică, rezistență în curent alternativ, sau rezistență internă* a diodei, prin relația:

$$R_i = \frac{du_a}{di_a}, \quad (11.2)$$

care este inversul pantei caracteristicii statice.

Denumirile date acestei rezistențe, astăzi consacrate în literatura de specialitate, sînt relativ improprie și pot duce la confuzii.

Rezistența pe care o prezintă dioda la trecerea curentului redresat i_a este de fapt R_d . Numai dacă se consideră curentul format dintr-o componentă continuă I_{a0} și una alternativă $i_{a\sim}$ mult mai mică decît prima:

$$i_a = I_{a0} + i_{a\sim}, \quad (11.3)$$

atunci, dacă se încearcă suprapunerea efectelor într-un circuit presupus liniar, se poate considera în calcule că curentul I_{a0} împlinșă o rezistență R_d , dedusă din caracteristica statică pentru punctul de coordonate (U_{a0}, I_{a0}) iar curentul $i_{a\sim}$ împlinșă o rezistență R_i , care este inversul pantei în același punct.

Cînd caracteristica statică se aproximează cu o linie dreaptă care trece prin origine, rezistența R_d și R_i se confundă în aceeași valoare.

C. Dioda cu gaz (gazotroane)

12. Efectul gazului într-o diodă termioinică. Dacă într-o diodă cu vid înaintat există o mică cantitate de gaz, caracteristicile tubului sînt mult schimbate față de cele ale tubului cu vid.

Pentru a înțelege acțiunea gazului și importanța relativă a diferitelor sale efecte, este mai bine să se examineze caracteristicile obținute experimental, cînd o mică cantitate de vapori de mercur sau de gaz este introdusă într-o diodă cu vid înaintat și filament de wolfram.

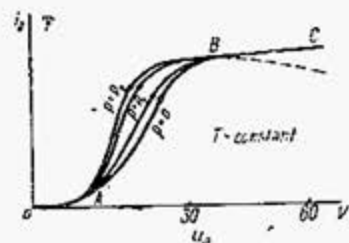


Fig. 11. — Variația curentului anodic într-o diodă cu filament de wolfram, cînd presiunea gazului crește.

Cînd cantitatea de gaz nu este apreciabilă, caracteristica tensiune-curent a unui astfel de tub, cu o temperatură constantă la filament, se aseamănă cu curba $p=0$ din fig. 11. Dacă se introduce un gaz la o presiune foarte scăzută p_1 , curba crește după cum se vede, însă atinge în mod practic același curent de saturație. Dacă se mai adaugă gaz, caracteristica ia forma curbei pentru $p=p_2$. Adesea curba prezintă discontinuități și de obicei curentul este diferit pentru tensiuni crescătoare sau descrescătoare, adică curba completă tensiune-curent — care rezultă cînd tensiunea crește de la zero la o valoare mare și apoi descresce înapoi la zero — poate să fie o buclă, astfel cum este indicat în figură. La tensiuni înalte, curentul de obicei scade cînd tensiunea crește. Efectul principal al gazului este simțit în regiunea AB din fig. 11, în care curentul în lipsa gazului ar fi limitat de sarcina spațială.

Gazul are un efect mic asupra capacității tubului de a conduce curentul, de aceea curentul de saturație indicat în regiunea BC este foarte puțin schimbat.

Tuburile care conțin gaze la presiune mică care să producă comportarea arătată (fig. 11) nu sînt de importanță practică în prezent. Tubul cu filament de wolfram și o mică cantitate de gaz s-a menționat numai pentru că el ilustrează primele faze de tranziție care au loc cînd se adaugă într-un tub cu catod termioinic (cald) un gaz în cantitate din ce în ce mai mare.

13. Dioda cu gaz cu catod termioinic. Creșterea cantității de gaz produce mărirea numărului ionilor pozitivi care iau naștere la ciocnirea unui electron cu moleculele gazului. Aceasta face ca curba tensiune-curent din fig. 11 să crească mai abrupt între punctele AB . Dacă presiunea gazului este suficientă, curba dintre aceste puncte devine verticală sau chiar se înclină într-o direcție care arată o descrescere a tensiunii la creșterea curentului. Această caracteristică este reprezentată adesea printr-o curbă tensiune-curent, ca în fig. 12 unde pozițiile axelor curentului și tensiunii au fost inversate față de situația din fig. 11. Pe măsură ce tensiunea crește de la zero, curentul în tub este foarte mic atît timp cît tensiunea este prea mică pentru a produce o ionizare apreciabilă (în fig. 12, curba curentului de la zero pînă la aprinderea tubului se confundă cu axa ordonatelor). Cînd ea atinge o valoare critică a curentului (în apropierea punctului A din fig. 11), curentul crește brusc la o valoare limitată numai de rezistența circuitului exterior sau de emisia catodului și apare atunci în tub o luminescență vizibilă; se spune că tubul s-a aprins.

Dioda cu catod termioinic în care s-a introdus gaz inert sau vapori de mercur pentru a produce o curbă caracteristică de forma arătată în fig. 12, se numesc *dioda cu gaz sau gazotroane*. Deoarece în diodele cu gaz se întrebuințează aproape întotdeauna catodi cu oxizi, limitarea curentului de emisie indicat în regiunea BC a fig. 11 nu are loc și, după cum se vede în fig. 12, tensiunea la tubul cu gaz în contrast cu tubul cu vid este aproape independentă de curent pe întreaga regiune utilă a ei. Tensiunea este de ordinul potențialului de ionizare al gazului deși din cauza acțiunii atomilor metastabili ¹⁾ și a ionizărilor duble valoarea sa exactă este adesea ceva mai mică. La diodele cu gaz obișnuite, această valoare este cuprinsă între 10 și 20 V; căderea de tensiune constantă pe tubul cu gaz are o importanță mare în aplicație, deoarece curentul prin tub trebuie să fie limitat numai de circuit, altfel tubul poate fi distrus. Un tub cu gaz legat la bornele unei surse de tensiune constantă mai mare decît căderea de tensiune pe tub se comportă ca și cum ar fi de fapt un scurtcircuit. Din cauza căderii de tensiune mici și constante, diodele cu gaz pot să conducă curenți mari cu pierderi de puteri mici; de aceea ele sînt indicate ca elemente redresoare de mare randament în circuite de curent mare.

14. Distribuția potențialului într-o diodă cu gaz. Distribuția potențialului într-o diodă cu gaz ca cea arătată în fig. 13 este complet diferită de aceea din tubul cu vid. Figura corespunde unei diode în care catodul și anodul sînt două plăci paralele.

Astfel, distribuția potențialului în vid este o linie dreaptă, iar distribuția în cazul tubului cu vid ascuțită de legea $3/2$.

¹⁾ *Stări metastabile*. La mișcarea electronilor unui atom în jurul nucleului pe diferite orbite, se asociază diferite nivele de energie fixe. Electronii pot sări de pe o orbită pe alta, deci pierd sau cîștigă o anumită energie. Există anumite nivele de energie, denumite *nivele metastabile* la care electronii nu pot să sară pe un nivel inferior. Pentru ca un electron să poată părăsi o stare metastabilă, trebuie să primească mai întîi o energie suplimentară trecînd astfel de la un nivel de energie superior, de la care poate să se producă apoi o trecere la un nivel inferior sau normal oarecare.

Motivul existenței stărilor metastabile nu se cunoaște, dar se constată experimental că astfel de nivele metastabile există în mulți atomi.

Panta curbei din fig. 13 pentru vid este constantă, deoarece sarcina spațială este nulă în orice punct. Curba pentru dioda cu vid înaintat are concavitatea în sus, ceea ce indică prezența unei sarcini spațiale negative. Curba pentru dioda cu gaz arată prezența unei sarcini spațiale de ioni pozitivi în regiunea din apropierea punctului A.

Spațiul dintre electrozi într-un gazotron în stare de conducție poate fi împărțit în două regiuni cu proprietăți foarte diferite. Prima regiune, numită *stratul de ioni pozitivi* sau *stratul catodic*, este regiunea OA din fig. 13, iar a

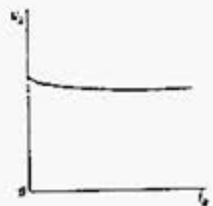


Fig. 12. — Caracteristica tensiune-curent a unei diode cu gaz (gazotron).

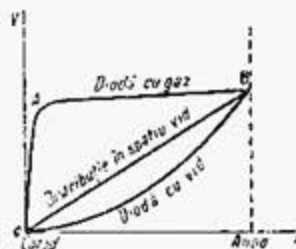


Fig. 13. — Comparatie între distribuțiile de potențial în dioda cu vid înaintat și dioda cu gaz.

doua regiune denumită *plasmă*, este regiunea AB din aceeași figură. În stratul de ioni pozitivi, electronii emiși de catod sunt accelerați de câmpul electric și sunt proiectați în plasmă cu mare viteză. Într-un mod similar, ionii pozitivi care ating stratul venind din plasmă, sunt atrași spre catod. Din cauza potențialului relativ constant al plasmăi, căderea de tensiune pe strat este practic egală cu întreaga cădere de tensiune pe tub. Această cădere de tensiune pe strat se numește adesea *cădere de tensiune catodică*. Din cauza masei lor mai mari, ionii ating viteze mult mai mici decât electronii. Astfel, deși curentul de ioni pozitivi este neglijabil în comparație cu curentii de electroni (deoarece r al mulți electroni trebuie să traverseze tubul pentru fiecare ion pozitiv produs), ionii pozitivi se mișcă mult mai încet decât electronii, înfi în regiunea OA, cu excepția vecinătății imediate a catodului, sarcina spațială este formată aproape în întregime din ionii pozitivi. În consecință, curentul de ioni pozitivi prin strat ascultă cu aproximație legea $3/2$ modificată, pentru a ține seama de masa mai mare a ionilor pozitivi. Acest curent trebuie să fie egal cu debitul cu care ionii pozitivi ajung la strat venind din plasmă. Grosimea stratului se modifică de la sine, astfel încât să rezulte această egalitate.

Accumularea ionilor pozitivi și electronilor în plasmă nu are efect o sarcină spațială aproape nulă.

Plasma poate fi privită ca un amestec de trei gaze: un gaz de electroni, un gaz de ioni pozitivi și un gaz molecular. Ea mai poate fi privită și ca foarte asemănătoare cu un conductor metallic prin faptul că electronii se mișcă în ea într-un mod întâmplător și conduc curentul prin vitezele de deplasare ce le obține datorită câmpului electric. Lungimea plasmăi se modifică de la sine, astfel încât să umple tubul cu excepția unui spațiu foarte restrâns ocupat de stratul de ioni pozitivi în jurul catodului. Schimbând distanța dintre anod și catod înseamnă a schimba doar lungimea plasmăi și din cauza căderii de tensiune foarte mici din plasmă, aceasta are un efect mic asupra căderii de tensiune totale pe tub.

15. *Dezintegrarea catodului prin bombardamentul ionilor pozitivi.* Din cauză că regiunea în care potențialul crește repede în apropierea catodului are o grosime extrem de mică (de ordinul unei traiectorii libere medii sau chiar mai puțin) aproape orice ion pozitiv care lovește catodul sosește cu o energie corespunzătoare aproape întregii tensiuni anodice. Bombardamentul care rezultă distruge adesea stratul de thoriu sau de bariu de pe suprafața catodului și produce o scădere rapidă a proprietății de emisie. În această privință, există o valoare limită a energiei ionilor și deci a tensiunii anodice sub care catodul nu-și pierde activitatea sa. Fig. 14 arată rezultatele obținute experimental asupra efectului de dezintegrare a vaporilor de mercur într-o diodă cu catod din wolfram thoriat. Când tensiunea anodică crește, curentul crește la început pe măsură ce debitul cu care electronii atrași de anod se apropie de debitul cu care ei sunt emiși pe cale termionică de catod. Când tensiunea depășește aproximativ 22 V, curentul scade, deoarece rezultă o reducere a emisie termionice produse de distrugerea stratului de thoriu prin ciocnirile ionilor pozitivi formați de gaz.

Emisia care se produce la aceste tensiuni crescute este dată de porțiunea de suprafață care rămâne acoperită mai departe, deoarece se produce un echilibru între debitul cu care thoriul este împrăștiat de bombardarea ionică și debitul cu care el este înlocuit prin difuziunea thoriului din interiorul metalului, la suprafață. Atât timp cît tensiunea anodică se menține sub valoarea critică de 22 V în raport cu capătul negativ al catodului, ionii pozitivi ai vaporilor de mercur nu au un efect de dezactivare, indiferent de debitul cu care ei lovesc catodul. Acțiunea argonului, neonului și vaporilor de mercur, la alte presiuni de ordinul unei fracțiuni dintr-un milimetru coloană de mercur, este asemănătoare cu cea arătată în exemplul de mai înainte, cu excepția că tensiunea critică denumită *tensiune de dezintegrare* depinde de natura gazului. Astfel, tensiunile de dezintegrare sînt de 22 V pentru mercur, de 25 V pentru argon, de 27 V pentru neon. Ionii pozitivi nu au un efect dăunător asupra catodului, fie că acesta este din oxizi sau din wolfram thoriat, cînd tensiunea anodică se menține sub aceste valori.

16. *Randamentul de emisie al catodului.* Deși introducerea gazului nu afectează decât capacitatea tubului termionic de a conduce curentul, ea mărește totuși randamentul practic de emisie realizabil printr-o construcție potrivită a catodului. Într-un tub cu vid înaintat, suprafața metalului emiten trebuie să fie expusă direct la câmpul creat de anod; de aceea se așează în apropierea anodului, pentru ca în plus efectul sarcinii spațiale să fie mic.

Din cauză că suprafața catodului este descoperită, el pierde căldură prin radiație pe întreaga suprafață care emite electroni.

La tuburile cu gaz, catodul poate fi introdus într-o cavitate care să-l protejeze contra pierderilor prin radiație, deoarece plasma se poate prelungi pînă în interiorul cavității, împreună cu stratul de ioni pozitivi care urmărește suprafața catodului.

În fig. 15a și 15b se arată filamentele răsucite în formă de spirală sau în zig-zag pentru a mări randamentul de emisie, micșorînd în același timp pierderea

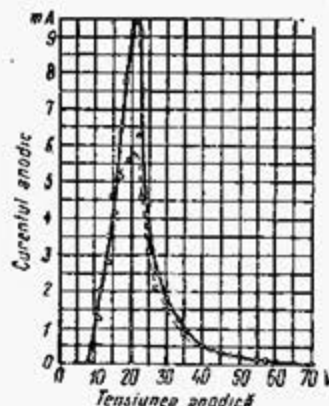


Fig. 14. — Efectul de dezintegrare al ionilor pozitivi asupra unui filament din wolfram thoriat la 1900 °K în argon la 0,03 mm col. Hg. Curba plină corespunde tensiunii crescătoare; curba punctată, tensiunii descrescătoare.

de căldură prin radiație din cauza reflecțiilor care se produc între părțile adiacente ale filamentului. În aceeași figură se văd și alte tipuri de catodi de mare randament. În fig. 15f se văd o serie de cilindri de ecranare a căldurii, așezați în jurul catodului, iar suprafețele interioare ale cilindrilor sunt acoperite cu oxizi pentru a mări suprafața de emisie. Cei doi cilindri exteriori reflectă căldura în spre interior și reduc radiația de căldură. Aripioarele adaugă mult la suprafața de emisie, dar prea puțin la radiația căldurii. Cu titlu de exemplificare, se poate arăta că un catod mare ecranat poate avea un curent de emisie

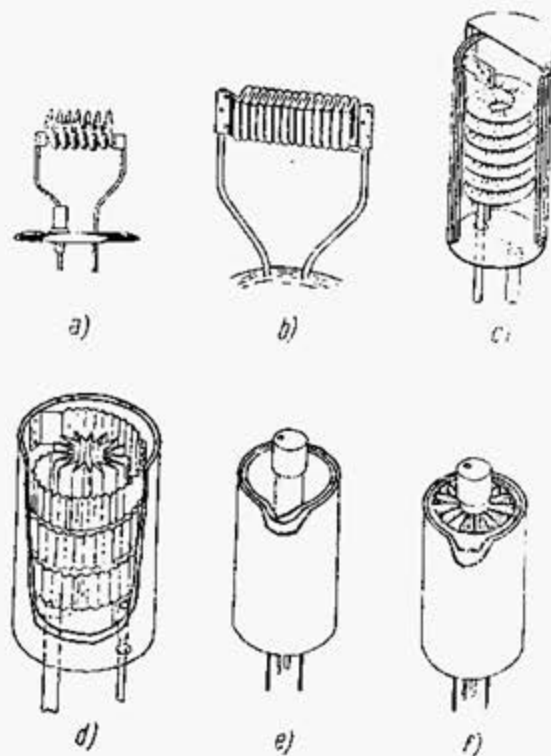


Fig. 15. - Construcția catodilor cu ecran de căldură pentru gazotroane.

este determinat de aceste considerații. Dacă presiunea este destul de mare, ea micșorează debitul de evaporare al catodului și permite funcționarea lui la temperaturi mai mari și cu un randament de emisie ridicat. Tuburile redresoare din practică, pentru redresorile de încălzire a bateriilor sunt de acest tip.

Deși o presiune de gaz ridicată este de dorit într-un tub redresor termoionic, deoarece reduce debitul de evaporare al catodului, ea trebuie evitată totuși pentru motivul că scade proprietatea tubului de a rezista la tensiunea de polaritate inversă. Dacă presiunea este prea mare, se poate produce o străpungere urmată de un arc și curentul prin tub poate curge în sens invers. Atunci tubul conduce în ambele sensuri și încetează de a funcționa ca redresor. Tensiunea inversă de străpungere urmează legea lui Paschen (v. vol. I, cap. III, § 172), și deci scade când presiunea

de 600 A și un filament de încălzire care consumă 80 A și 5 V. Randamentul de emisie corespunzător este atunci 1 500 mA/W, pe cind un catod obișnuit format dintr-o panglică acoperită cu oxizi, fără ecranare, utilizat într-un gazotron are un randament de emisie de numai 100 mA/W.

Un catod într-un gazotron trebuie lăsat să se încălzească pînă la temperatura normală înainte de închiderea circuitului anodic, căci căderea de tensiune în tub poate depăși tensiunea de dezintegrare din cauză că, insuficient încălzit, catodul nu este în stare să furnizeze curentul de emisie cerut de sarcină.

17. Efectul presiunii gazului asupra caracteristicilor diodelor cu gaz. Presiunea gazului (sau mai exact concentrația gazului) într-o diodă influențează caracteristicile de funcționare ale tubului în trei moduri, și anume: debitul de evaporare al catodului, căderea de tensiune în tub în starea de conducție și tensiunea inversă de străpungere. Intervalul practic al presiunii de lucru

crește pînă cînd se atinge un minimum. Se alege, de obicei, presiunea în apropierea acestui minim la tuburile cu presiune mare care au în consecință o tensiune inversă maximă de numai câteva sute de volți și nu sînt potrivite pentru redresarea tensiunilor înalte.

Presiunea gazului nu trebuie să fie redusă prea mult cu scopul de a crește tensiunea inversă a tubului. Dacă presiunea este prea mică, densitatea gazului este insuficientă și numărul moleculelor de gaz prea mic pentru a furniza ionii pozitivi necesari neutralizării sarcinii spațiale, atunci cînd tubul trebuie să producă

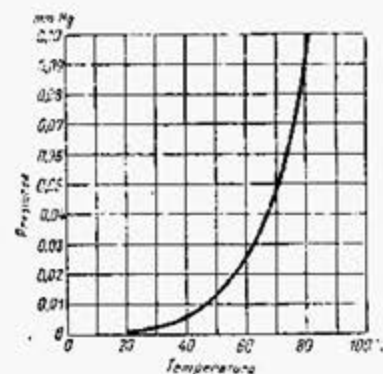


Fig. 16. - Presiunea vaporilor de mercur în funcție de temperatura mercurului condensat.

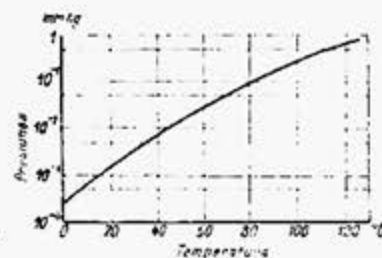


Fig. 17. - Variația presiunii vaporilor de mercur cu temperatura în coordonate logaritmice.

curentul său nominal. O presiune prea mică produce o mare cădere de tensiune din care rezultă dezintegrarea catodului. La presiune scăzută se poate obține totuși o cădere de tensiune mai mică dacă se reduce valoarea curentului sub valoarea nominală a tubului. Există astfel pentru fiecare gazotron un interval de presiuni admis în funcționarea tubului, care dacă este depășit, trebuie să se micșoreze tensiunea inversă a tubului, iar dacă scade sub limita inferioară trebuie să se scadă curentul maxim admis în tub.

Vaporii de mercur într-un gazotron cu vaporii de mercur se află într-un echilibru de presiune care depinde de temperatura mercurului lichid din tub. Presiunea depinde deci de temperatura părții celei mai reci a tubului care este locul în care se condensează vaporii de mercur. În fig. 16 se arată relația dintre presiunea din tub și temperatura mercurului condensat. În coordonate logaritmice, această relație are o reprezentare aproape liniară ca în fig. 17. Deoarece tensiunea inversă pe care tubul o poate suporta depinde de presiunea vaporilor de mercur, ea depinde deci direct de temperatura mercurului condensat în modul arătat în fig. 18 pentru un anumit gazotron. Pentru un alt gazotron, curbele din fig. 19 arată în plus variația căderii de tensiune pe tub și a curentului anodic maxim cu temperatura.

În fig. 20 și 21, s-a reprezentat variația căderii de tensiune pe tub cu curentul și temperatura la un gazotron FG-32 de curent mic.

Tuburile cu gaz în care se folosesc gaze nobile, argon, neon, heliu, kripton și xenon, posedă un avantaj față de tubul cu vaporii de mercur, și anume că concentrația gazului este independentă de temperatură. Totuși, concentrația gazului în aceste tuburi variază lent în timpul vieții tubului, din cauza absorbției gazului de către pereții și electrozii tubului în timpul funcționării. Gazele nobile

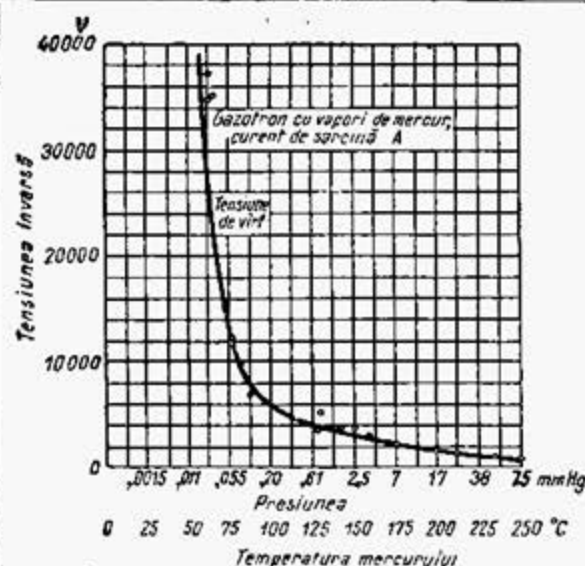


Fig. 18. — Tensiunea inversă de străpungere a unei diode cu gaz în funcție de presiunea vaporilor de mercur și de temperatură.

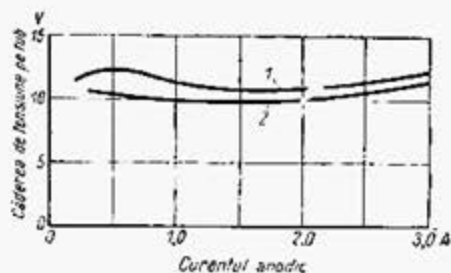


Fig. 20. Variația căderii de tensiune în funcție de curent la gazotronul FG-32: 1 — temperatura mercurului 30°C; 2 — temperatura mercurului 40°C.

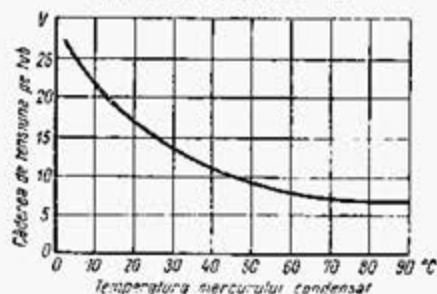


Fig. 21. — Variația căderii de tensiune pe tub în funcție de temperatura mercurului condensat la gazotronul FG-32. Curentul prin tub constant = 2,5 A.

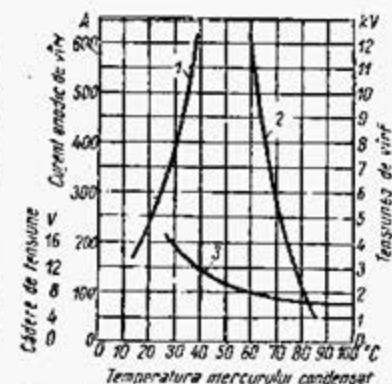


Fig. 19. — Caracteristicile unei diode cu gaz:

1 — curentul anodic inițial de vîrf; 2 — tensiune inversă; 3 — cădere de tensiune pe tub pentru 600 A curent de vîrf.

se utilizează în general în tuburile cu gaz de tensiune mare, deoarece presiunea gazului în aceste tuburi trebuie să fie cuprinsă între limite destul de înguste și viața unui astfel de tub ar fi scurtă din cauza fenomenului de mai sus. În tuburile de tensiune mică, gazele nobile se utilizează adesea pentru că nu se cere ca presiunea să rămână cuprinsă în limite atât de înguste și se poate introduce inițial suficient gaz pentru a ține seama de scăderea presiunii cu timpul.

În tabela 5 sînt date caracteristicile gazotroanelor fabricate în U.R.S.S.

D. Triode cu gaz (tiratroane)

18. Efectul gazului într-o triodă termoionică cu vid înaintat. Într-o triodă cu vid înaintat (v. vol. I, cap. III, § 180), cînd grila este la un potențial negativ în raport cu catodul, în circuitul de grilă nu curge nici un curent, deoarece electronii sînt respinși de grila negativă. Cînd în tub există urme de gaz, grila negativă poate să atragă ionii pozitivi și astfel să ia naștere un curent de grilă important. Măsurarea curentului la o grilă negativă se folosește de obicei ca un mijloc de măsură precis pentru evaluarea vidului din tub. Pentru ca o triodă obișnuită să funcționeze satisfăcător într-un amplificator electronic, este necesar să se mențină un vid înaintat în tub spre a evita formarea ionilor pozitivi. Cînd într-o triodă se constată un curent de grilă chiar dacă grila este la un potențial negativ față de catod, este un indiciu că presiunea în triodă a crescut. Dacă presiunea crește mai departe, se întîmplă fenomene asemănătoare cu cele întîlnite în diodele cu gaz și anume, o neutralizare apreciabilă a sarcinii spațiale după care caracteristicile anodice se îndepărtează mult de la forma normală. La presiuni destul de mari sarcina spațială negativă este complet neutralizată în majoritatea spațiului din tub, se formează o plasmă, și un strat de ioni pozitivi se constituie în jurul catodului. Cînd plasma s-a format, grila pierde aproape în întregime proprietățile sale de comandă și comportarea tubului este cu totul modificată. Tubul devine o triodă cu gaz sau un tiratron și utilizarea sa este cu totul diferită de aceea care se dă triodei cu vid înaintat.

Curentul total de conducție de grilă într-o triodă termoionică cu vid înaintat se compune din mai multe componente, din care cele mai importante sînt:

- curentul care rezultă din electronii captați de grilă;
- curentul care rezultă din ionii captați de grilă;
- curentul care traversează rezistența de izolație dintre grilă și celalți electrozi ai tubului;
- curentul care rezultă din emisiunea secundară a grilei;
- curentul care rezultă din emisiunea fotoelectrică a grilei;
- curentul care rezultă din bombardarea grilei de către razele X moi, produse de anod.

În funcționarea tuburilor cu gaz (tiratronul), curentul total de grilă este adesea de ordinul miliamperilor. Primele două componente ale curentului de grilă arătate mai sus predomină. În funcționarea tuburilor cu vid înaintat este adesea extrem de important să se mențină un curent de grilă foarte mic, în unele aplicații chiar mai mic decît 10^{-15} A, din care motiv trebuie luate precauții în construcția tubului pentru a evita ca vreuna din componentele curentului de grilă să devină exagerat de mare.

Variația primelor trei componente ale curentului de grilă într-un tub cu vid înaintat este arătate în fig. 22. Atît curentul anodic i_a cit și curentul de grilă i_g sînt trasați pentru o tensiune anodică constantă în funcție de tensiunea de grilă u_g . Scările pentru cei doi curenți sînt însă diferite, deoarece pe cînd curentul anodic poate

Tabela 5. Caracteristicile gazotroanelor fabricate în U.R.S.S.

Tipul	Număr de anodi	Tipul catodului 2)	Tensiune inversă maximă admisibilă	Intensitatea maximă admisibilă (valoare de vârf)	Voltaj maxim admisibil (valoare medie)	Tensiune de încălzire	Valoarea maximă a curentului de încălzire	Valoarea de tensiune pe tub (maximă)	Tipul minium necesar pentru încălzirea filamentului	Tensiunea de aprindere	Tempul de încălzire a catodului după o perioadă de păstrare a tubului	h Durata medie de servicie	Gas de umplere
1. Reducatoare de tensiune joasă ($U_{\text{cat}} = 500 \text{ V}$)													
BT-176	2	d	150	9	6	2,5	11 V	14	0,5	20	0,5	1 000	Gas inert
2. Reducatoare de tensiune înaltă ($U_{\text{cat}} = 500 \text{ V}$)													
BT-161	1	d	1 000	1,0	0,225	5	3	15	0	20	45	1 500	Vapori de mercur
BT-129	1	d	2 500	1,0	0,3	2,5	6	14	3	30	45	1 500	Vapori de mercur
BT-236	1	d	5 000	1,5	0,5	2,5	9	15	3	25	60	2 000	Vapori de mercur
BT-207	1	d	7 000	4,0	1,3	2,5	20	16	5	25	90	2 000	Vapori de mercur
BT-163	1	d	10 000	10	3,5	5,0	22	18	30	60	120	3 000	Vapori de mercur
BT-1,5/3 000	1	d	15 000	50	16	5,0	32	20	1	1	130	2 000	Gas inert
BT-100/15 000	1	d	5 000	1,5	0,5	2,5	8,5	20	30	1	130	2 000	Gas inert

Observații. — 1) Pentru această valoare se obține la curenții anodici total al tubului ($I_a = 6 \text{ A}$).
2) Prescurtările în rubrica «tipul catodului»: «d» reprezintă încălzire directă și «i» încălzire indirectă.

fi de ordinul miliamperilor, curentul de grilă poate fi de ordinul microamperilor sau mai puțin.

Componenta curentului de grilă, produs de electronii care lovesc grila, este arătată de curba punctată din fig. 22. Din cauza vitezelor inițiale pe care le au electronii când părăsesc catodul și din cauza potențialului de contact dintre grilă și catod, electronii pot să ajungă la grilă, deși aceasta este negativă în raport cu catodul.

Energia cinetică medie a electronilor emiși pe cale termică, legată de componenta vitezei pe o direcție perpendiculară pe suprafața catodului, este dată de relația:

$$\frac{kT}{Q_r} = \frac{T}{11\,605}, \quad (18.1)$$

exprimată în eV, în care:

T este temperatura catodului, în $^{\circ}\text{K}$;

k — constanta lui Boltzmann.

În consecință, electronii emiși de către un filament cu o temperatură ridicată de aproximativ $2\,400^{\circ}\text{K}$ au o energie medie legată de componenta lor normală de numai $0,2 \text{ eV}$. Numărul electronilor care au energie mai mare scade exponențial pe măsură ce energia pe care o posedă crește, astfel încât un potențial de grilă negativ de $1 - 2 \text{ V}$ este, în general, suficient pentru a reduce curentul de grilă la o valoare neglijabilă.

Componenta curentului de grilă care trece prin rezistența de izolație a tubului cu vid, și care se numește curentul de scurgere, este reprezentată de a doua curbă punctată din fig. 22. Călea curentului de scurgere se află atât în interiorul cit și la exteriorul tubului, pe suprafața sticlei sau altei suprafețe izolante care separă electrozii și diferitele fire de legătură. În diagramă, curentul de scurgere se consideră că rezultă numai din tensiunea de grilă și că el este proporțional cu această tensiune.

Componenta curentului de grilă produs de ionii pozitivi captați de grilă este arătată de a treia curbă punctată din fig. 22. Acest curent este o funcție de debitul cu care se produce ionizarea în tub. Pentru presiuni mici și tensiuni anodice constante, această componentă este aproape direct proporțională cu valoarea curentului de electroni care produce ionizarea și cu presiunea. Proporționalitatea dintre curentul de ioni pozitivi din curentul total de grilă și curentul anodic I_a la presiune constantă este arătată de curba din fig. 22, în care curentul de ioni pozitivi se vede că se anulează o dată cu curentul anodic. Deoarece un curent de electroni pe o grilă se numește în mod convențional pozitiv, curentul de ioni pozitivi se numește atunci negativ. Din acest motiv este trasat în figură în jos și apare cu o imagine a curentului anodic față de axa orizontală. În sfârșit, curentul total de grilă rezultă ca suma algebrică a celor trei componente de mai sus și are o formă caracteristică arătată de curba I_g din fig. 22.

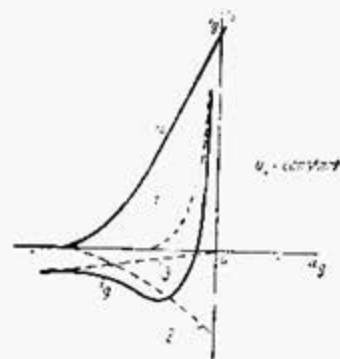


Fig. 22. — Curentul de grilă care rezultă din electroni, ioni pozitivi și prin scurgere, la o triodă:
1 — curent electronic; 2 — curent de ioni pozitivi; 3 — curent de scurgere.

Creșterea presiunii gazului din tub face să crească componenta de ioni pozitivi a curentului de grilă, însă lasă nemodificate componenta curentului de electroni și componenta curentului de scurgere.

Când presiunea crește de la p_1 la p_2 cum se arată în fig. 23, curba curentului anodic pentru p_2 este deasupra curbei pentru p_1 și componenta curentului de ioni pozitivi al curentului de grilă crește mai repede decât presiunea. Deși nu se arată în diagramă, curbele curentului anodic și curentului de grilă sînt diferite când tensiunea grilei este în creștere sau în descreștere.

Pe măsură ce presiunea crește mai departe, se atinge în cele din urmă o valoare pentru care comportarea tubului se schimbă total și tubul ia caracteristicile unui tiratron. Dacă la această presiune grila se negativează foarte mult înainte de aplicarea tensiunii anodice, iar apoi se scade treptat negativarea, curentul anodic și curentul de grilă cresc în mod continuu pînă ce se atinge o valoare particulară a tensiunii de grilă pentru care tubul se aprinde. Atunci se formează în tub plasma și ambii curenți cresc brusc. Curentul anodic este limitat numai de rezistența circuitului exterior, la fel ca la o diodă cu gaz. Grila și catodul triodei sînt înconjurare de straturile de ioni pozitivi, iar tensiunea grilei nu are nici un efect asupra curentului anodic. Această comportare este ilustrată de curbele pentru presiunea p_2 din fig. 23. Linile orizontale indică lipsa de control a grilei după ce tubul s-a aprins. Grila are deci o acțiune de declanșare a descărcării din tub.

19. Efectul gazului într-un tiratron. Deși numele de tiratron este aplicat, de obicei, unei triode cu gaz cu catod termoionic care emite continuu, el se folosește uneori și la triodele cu gaz cu baie de mercur, unde nu se produce o emisie termoionică. În tub trebuie să existe o presiune de gaz suficientă pentru a forma plasma cînd se aplică tensiunea anodică.

α) Rolul grilei în tiratron. Rolul grilei este de a preveni formarea plasmă pînă la un anumit moment dorit. Într-un astfel de tub, acțiunea de declanșare a grilei descrișă mai înainte este o caracteristică fundamentală. Cînd grila este adusă treptat de la un potențial negativ la potențiale din ce în ce mai puțin negative, ea permite la un moment dat să apară curentul anodic și tubul să se aprindă. Înainte ca tensiunea de grilă să atingă o anumită valoare critică, care depinde de tensiunea anodică, curentul anodic este neglijabil. După ce însă tensiunea de grilă critică a fost depășită, grila nu mai are un control apreciabil asupra curentului anodic. Tensiunea anodică scade la o valoare de 10 - 20 V, iar curentul anodic trebuie să fie limitat de o impedanță în serie cu anodul pentru a evita distrugerea tubului. În afară de aceasta, o impedanță este necesară și în serie cu grila, pentru a evita un curent de grilă prea mare, mai ales dacă se aplică pe grilă o tensiune alternativă care pozitivează grila pe o jumătate de perioadă. Dacă grila redevine negativă după ce tubul s-a aprins, ea nu mai este în stare să oprească curentul anodic (afară de cazul cînd curentul anodic este limitat la o valoare mică de impedanța circuitului, cînd o grilă foarte negativă poate uneori să-l întrerupă). Pentru ca grila să-și poată recăpăta proprietățile de comandă, curentul anodic trebuie să fie întrerupt, anulînd tensiunea anodică sau inversînd polaritatea ei.

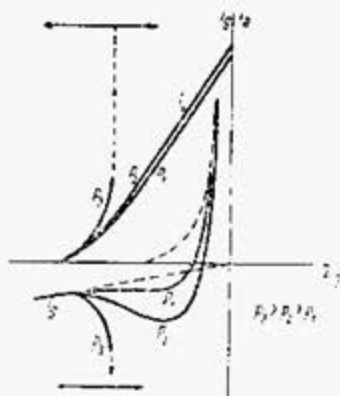


Fig. 23. — Efectul presiunii gazului asupra curenților de grilă și anodic la o triodă.

Un tub de acest fel poate servi ca un releu, dar nu ca un amplificator. În funcționarea ca releu, acțiunea sa este extrem de rapidă, numai că acest fel de releu trebuie readus de fiecare dată în starea inițială, reducînd la zero tensiunea anodică și curentul. Această readucere se poate face foarte ușor dacă se utilizează o tensiune de alimentare alternativă în circuitul anodic, astfel încît anodul să devină negativ în mod practic și să rămînă negativ un timp suficient de lung, pentru ca plasma să poată dispărea. Tensiunea de grilă determină momentul din fiecare semiperioadă pozitivă a tensiunii anodice pentru care tubul se aprinde. În timpul semiperioadei negative următoare, curentul se anulează și grila poate să-și recapete proprietățile de control, astfel încît poate să determine începerea conducției în semiperioada pozitivă următoare. În modul acesta, grila influențează valoarea medie a curentului anodic redresat.

Comportarea unui tiratron în circuitul de utilizare este diferită de trioda cu vid înaintat. Pe lângă aceasta, construcția sa internă este și ea diferită și influența acestei construcții asupra comportării tiratronului trebuie bine înțeleasă, pentru a pune tubul în condiții de funcționare potrivită. Din cauza formării plasmă, este posibil să se utilizeze un catod cu oxizi cu ecran de căldură de mare randament așa cum s-a arătat la gazotron, obținîndu-se astfel o valoare ridicată a curentului anodic, în raport cu puterea de încălzire cheltuită la catod. Totuși trebuie să se permită un timp de încălzire suficient de lung pentru ca să se atingă temperatura necesară catodului înainte ca să se poată obține curentul anodic necesar. Pe de altă parte, curentul maxim anodic nu trebuie să depășească valoarea nominală, deoarece altfel suprafața catodului poate fi distrusă de bombardamentul ionilor pozitivi. Curentul mediu anodic trebuie să fie limitat, pentru a evita încălzirea exagerată a tubului și a pieselor sale componente. Catodul poate fi supraîncălzit de energia cinetică și de căldura de neutralizare a ionilor care îl bombardează.

β) Acțiunea grilei înainte de aprinderea tubului. În fig. 24 se arată în mod aproximativ modul în care variază curentul de grilă într-un tiratron înainte de aprinderea lui, cînd presiunea se menține constantă iar tensiunea anodică ia diferite valori fixe. Cînd tensiunea anodică este scăzută și are de exemplu valoarea U_{a1} , numărul de ioni pozitivi format de fiecare electron care se deplasează spre anod este mic și un curent relativ mare este necesar pentru a produce plasma. Din acest motiv, grila trebuie făcută pozitivă pentru ca să apară curentul necesar și să formeze plasma. Punctul de aprindere a tubului este reprezentat pe figură printr-un cerc și o săgeată. În acest moment se produce o variație bruscă a curentului de grilă. Cînd grila este făcută pozitivă ea absoarbe un curent de electroni de la catod, astfel încît în momentul aprinderii curge un curent pozitiv de grilă, important. Cînd tensiunea anodică ia valori mai mari, posibilitățile de ionizare cresc, curentul anodic necesar pentru aprindere este mai mic și aprinderea tubului poate fi declanșată cu tensiuni de grilă negative și curenți de grilă relativ mici. În general, în tuburile normale, curentul de grilă la pornire, cu tensiuni de grile negative, este de ordinul 0.001 μA , sau mai puțin, iar curentul anodic critic este de ordinul 1 μA .

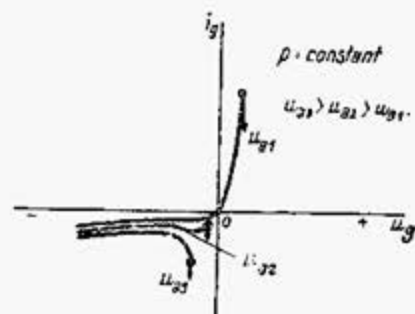


Fig. 24. — Curentul de grilă înainte de aprinderea gazului și la aprinderea acestuia.

20. Caracteristicile de comandă ale tiratronului. Dacă un tiratron funcționează cu curenți de grilă neglijabili, caracteristicile sale de funcționare importante sînt caracteristicile de comandă sau de pornire, adică caracteristicile care dau relația dintre tensiunile de grilă și tensiunile anodice pentru condiția de aprindere a tubului. În fig. 25 se arată o familie de curbe caracteristice pentru trei tuburi diferite cu vapori de mercur și pentru diferite temperaturi mercurului condensat. Fiecare caracteristică împarte regiunea diagramei în două. Prima, la dreapta și deasupra caracteristicii, în care tubul conduce, și alta, la stînga și dede-

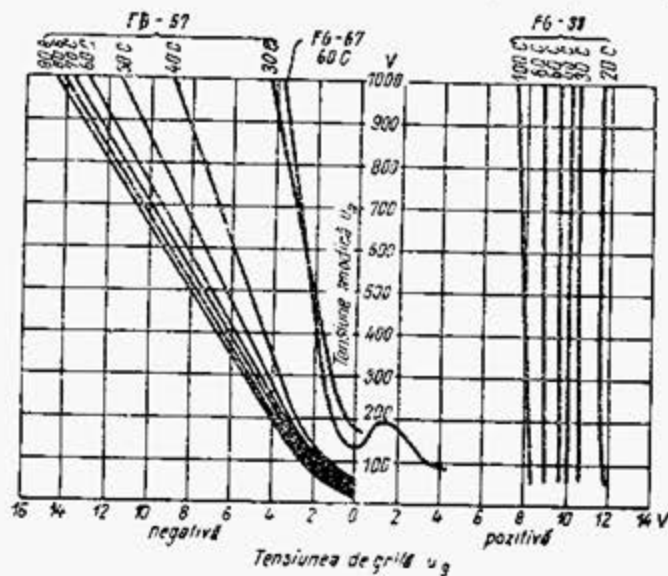


Fig. 25. — Caracteristicile de aprindere sau de comandă a tiratronelor cu vapori de mercur la diferite temperaturi ale mercurului condensat.

subtul caracteristicii, în care tubul este stins. Dacă pentru o tensiune anodică fixă tensiunea de grilă devine din ce în ce mai puțin negativă, aprinderea tubului se va produce în momentul cînd punctul reprezentativ pe diagramă cade pe caracteristică. Invers, pentru o tensiune de grilă fixă, aprinderea tubului se va produce cînd tensiunea anodică crește treptat și punctul reprezentativ cade pe curbă. Se observă că tensiunea de grilă poate controla numai începerea conducerii. Conducția nu încetează dacă curba este traversată de la dreapta spre stînga sau de sus în jos.

Tiratronurile se clasifică în două categorii: tiratronuri cu caracteristică de comandă negativă și tiratronuri cu caracteristică de comandă pozitivă.

În fig. 25, tuburile FG-57 și FG-67 sînt cu caracteristică negativă, iar tubul FG-33 cu caracteristică pozitivă.

21. Acțiunea grilei după aprinderea tubului. Explicarea faptului că grila nu are în mod practic nici un efect asupra curentului anodic cînd ea devine din nou negativă, după ce tubul s-a aprins, se poate găsi în apariția stratului de ioni pozitivi care se formează în jurul grilei negative. Fig. 26 arată un anod, un catod și două fire de grilă cilindrice ale unui tiratron. Cînd tubul s-a aprins, un strat de ioni pozitivi se formează în jurul catodului, iar spațiul dintre anod și

catod se umple cu plasma în care densitățile de ioni pozitivi și de electroni sînt aproximativ egale și în care potențialul este constant și practic egal cu potențialul anodului. Cînd grila este negativă față de plasmă, ea respinge electronii și atrage ioni pozitivi, astfel că spațiul din jurul ei este plin cu ioni pozitivi care se află în continuă mișcare spre grilă, sub influența cîmpului electric de la suprafața grilei. Cînd se atinge o stare de echilibru în scurgerea ionilor pozitivi, sarcina totală pozitivă în spațiul din jurul firelor de grilă este egală cu sarcina negativă indusă pe firele de grilă de tensiunea de negativare aplicată din exterior. În aceste condiții, sarcina electrică rezultată în interiorul spațiului ocupat de stratul de ioni pozitivi este nulă, iar plasma din exteriorul stratului nu este influențată de prezența grilei negative. În consecință, conducția dintre anod și catod se poate face prin plasma care rămîne între straturile de ioni care înconjoară firele de grilă. Grila negativă nu controlează și nu poate opri curentul anodic.

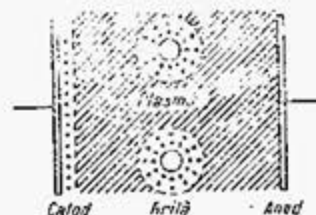


Fig. 26. — Straturi de ioni pozitivi în jurul firelor de grilă.

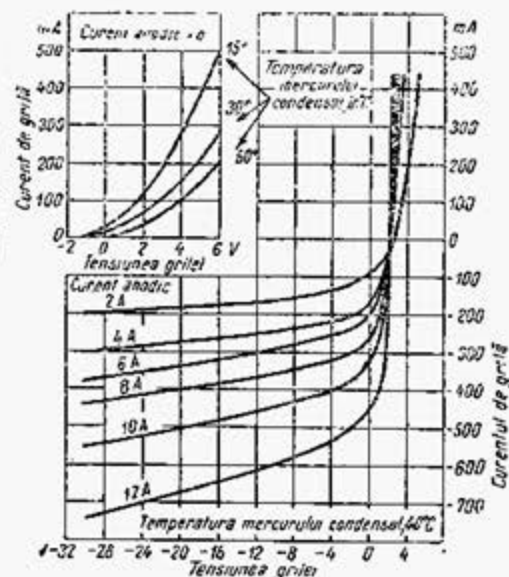


Fig. 27. — Curentul de grilă într-un tiratron după începerea conducerii.

Modul caracteristic în care curentul de grilă variază în funcție de tensiunea de grilă și de curentul anodic după aprinderea tubului se vede în fig. 27. Cînd se formează plasma și stratul de ioni în jurul grilei, curentul de grilă se schimbă brusc, după cum arată săgeata din fig. 24 și ia o valoare mult mai mare pe una din familiile de curbe din fig. 27. Curenții din fig. 27 pot fi de un bilion de ori mai mari decît cei din fig. 24. După începerea conducerii, variația tensiunii de grilă în regiunea tensiunilor negative nu mai produce decît variația grosimii stratului de ioni pozitivi, cu mici variații ale curentului de grilă, așa cum se vede în diagramă. Se observă o variație aproape liniară a curentului de grilă cu curentul anodic cînd tensiunea de grilă se menține constantă. Din cauza curentului de electroni care ajunge pe grilă cînd ea se află la un potențial aproape egal sau superior potențialului plasmă, curentul de grilă poate deveni foarte mare dacă grila este pozitivă. Pentru acest motiv este necesară o impedanță în serie cu grila care să limiteze curentul. Curenții mari care se pot produce la virfurile pozitive ale tensiunii de grilă și variațiile bruște de curent care apar la aprinderea tubului pot să producă impulsuri de curent și de tensiune în circuitul de grilă. Efectul acestor impulsuri asupra sursei de tensiune din circuitul de grilă trebuie avut în vedere la alegerea acestei surse.

22. **Timpul de ionizare și de defonizare.** Viteza cu care acționează un tiratron este importantă în aplicațiile sale. Ea depinde de timpul necesar plasmelor să se formeze și curentului anodic să atingă valoarea sa finală după ce tensiunea de grilă sau tensiunea anodică au obținut brusc valoarea care permite tubului să se aprindă; de asemenea, ea depinde de timpul necesar plasmelor să dispară și să permită grilei să-și revină proprietățile de control după ce tensiunea anodică s-a anulat. Aceste intervale de timp fixează o limită superioară pentru frecvența tensiunii de alimentare din circuitul anodic pentru care tubul mai poate servi ca un redresor cu grilă de comandă. De asemenea, ele limitează utilizarea tubului în procesul de inversiune a curentului continuu în curent alternativ.

Timpul de ionizare a tiratronului este cuprins între o microsecundă și mai multe microsecunde. El depinde de construcția tubului, de presiunea gazului, de tensiunile electrozilor și de parametrii circuitului. Timpul de defonizare depinde de aceiași factori, dar este de obicei mai lung, variind între câteva microsecunde, până la mai multe sute de microsecunde. Acest timp depinde nu numai de tub dar și de ansamblului tubului și circuitului de utilizare.

Tuburile cu timp de ionizare mic sînt tuburi cu caracteristica de comandă pozitivă și cer puteri apreciabile în circuitul de grilă la pornire.

23. **Construcția grilelor tiratronelor.** Spre deosebire de funcționarea sa în trioda cu vid înaintat, grila într-un tiratron trebuie să controleze densitatea maximă de curent în loc de densitatea medie a curentului care traversează suprafața sa. Aprinderea gazului din tub se produce dacă într-un punct oarecare densitatea de curent atinge o valoare critică. Deci, dacă una din găurile grilei este mai mare decât celelalte, curentul din gaura cea mai mare tinde să controleze momentul de aprindere, iar restul grilei poate fi masiv în loc să fie perforat, fără a influența prin aceasta simțitor caracteristicile de aprindere. De asemenea, din cauza acestor condiții, densitatea de curent critic poate să se producă de-a lungul unei căi care înconjoară grila, în loc să treacă prin grilă. În consecință, într-un tub cu gaz, grila trebuie să înconjoare fie anodul, fie catodul, într-un mod mai complet decât este necesar în tubul cu vid. Construcția obișnuită a unei triode cu vid înaintat nu este satisfăcătoare pentru un tiratron.

Construcția internă a unui tiratron cu un anod și o grilă are în principiu forma din fig. 28. Grila se compune dintr-un cilindru metalic solid care înconjoară atât anodul cât și catodul și o diafragmă cu o singură gaură așezată între anod și catod. Grila se face din crom-nichel, nichel carburat, grafit sau fier. Datorită marii sale suprafețe de radiație, ea rămîne relativ rece și dă o emisie de electroni neglijabilă. Când diafragma are o gaură mare, caracteristica de comandă a tubului este de tipul negativ. Când diafragma are mai multe găuri mici, caracteristica de comandă a tubului este de tipul pozitiv.

Suprafața mare a grilei arătate în fig. 28 provoacă un curent de grilă mare la pornire și o capacitate mare între electrozii care provoacă o impedanță de intrare pe grila mică. O astfel de impedanță este de evitat, dacă grila trebuie să fie excitată de o sursă de mare impedanță și putere mică. Pentru a reduce

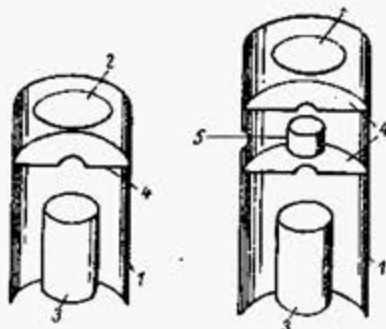


Fig. 28. — Construcția internă a unui tiratron cu o singură grilă: 1 — grilă; 2 — anod; 3 — catod; 4 — diafragmă.

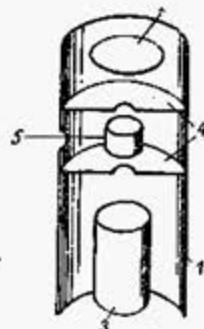


Fig. 29. — Construcția internă a unui tiratron cu două grile (tiratron tetrodă): 1 — grilă ecran; 2 — anod; 3 — catod; 4 — diafragmă; 5 — grilă de comandă.

și o capacitate mare între electrozii care provoacă o impedanță de intrare pe grila mică. O astfel de impedanță este de evitat, dacă grila trebuie să fie excitată de o sursă de mare impedanță și putere mică. Pentru a reduce

curentul de grilă la pornire și capacitatea grilei, se folosește un tub cu grilă ecranată arătate în fig. 29 care se poate numi tiratron tetrodă. În acest tub se folosește o grilă-ecran care se menține la un potențial fix în raport cu catodul. Ea realizează cea mai mare parte a funcțiunii de ecran necesară într-un tiratron și colectează majoritatea curentului de grilă de pornire. Grila de comandă propriu-zisă ia forma unui mic cilindru sau chiar a unui inel din sîrmă și se plasează între două diafragme ale grilei-ecran. Din cauza suprafeței sale foarte reduse, grila de comandă necesită un curent de pornire foarte mic; capacitatea sa față de electrozii vecini este mică. Variind mărimea tensiunii dintre grila-ecran și catod, caracteristica de comandă a unui astfel de tub poate fi făcută de tipul pozitiv sau negativ, după cum această tensiune scade sau crește.

24. **Efectele presiunii gazului asupra caracteristicilor tiratronului.** Într-un tiratron, tensiunea inversă necesară pentru străpungerea tubului și căderea de tensiune din starea de conducție sînt influențate de presiunea gazului în același mod ca la un gazotron. De aceea, presiunea trebuie menținută între limite de funcționare bine determinate, pentru ca tiratronul să poată suporta tensiunea sa inversă nominală și să poată debita curent nominal fără să se distrugă. În afară de aceasta, presiunea gazului influențează caracteristicile de comandă sau de aprindere arătate în fig. 25.

La tuburile cu vapor de mercur, presiunea depinde de temperatură și caracteristicile de comandă variază mult cu temperatura. Limita superioară a temperaturii de funcționare a unui tub cu vapor de mercur este fixată fie de valoarea maximă a tensiunii anodice directe, fie de valoarea tensiunii inverse de virf.

În tabela 6 sînt date caracteristicile tiratronelor fabricate în U.R.S.S.

25. **Comanda pe grilă a tiratronelor.** În circuitele redresoare care folosesc diode, curentul sau tensiunea redresată nu se pot regla decât dacă se folosește un autotransformator sau un dispozitiv similar prin care să se poată varia tensiunea sursei alternative. Dacă însă în locul diodei se folosește un tub cu o posibilitate de comandă, ca de exemplu tiratronul sau ignitronul (§ 38), tensiunea redresată poate fi reglată printr-un reglaj potrivit al tensiunii de grilă sau al curentului de aprindere. După cum s-a arătat la § 20, cu ajutorul tensiunii de comandă aplicate acestor tuburi se poate determina momentul la care apare conducția prin tub, dar nu se poate influența momentul de oprire al conducției. De aceea, aceste dispozitive nu sînt potrivite în cazul cînd tensiunea aplicată elementului redresor este continuă. Cînd însă tensiunea de alimentare este alternativă, ca în cazul circuitului redresor, defonizarea din tub poate avea loc în timpul alternanței negative a tensiunii aplicate și astfel grila de comandă sau electrodul de aprindere își pot recăpăta proprietatea de comandă. Întrînzînd momentul în care conducția apare la fiecare alternanță pozitivă, se poate influența valoarea medie a curentului anodic. Expunerea care urmează se referă la circuite redresoare folosind tiratron, însă principiile de bază descrise sînt aplicabile și la alte tipuri de tuburi cu electrod de comandă.

Metodele de comandă a tiratronelor se pot clasifica în două moduri: În primul rînd, metoda de comandă poate fi de tipul discontinuu închis-deschis sau de tipul continuu, adică tensiunea grilei se poate folosi pentru a comanda existența sau lipsa curentului anodic în circuitul de sarcină, sau tensiunea de grilă poate fi reglată în mod continuu pentru a varia curentul anodic mediu în mod continuu pe un interval oarecare.

În al doilea rînd, metodele de comandă pot fi clasificate după forma de undă a tensiunii de grilă. De exemplu, tensiunea grilei poate fi o tensiune continuă, o tensiune sinusoidală de aceeași frecvență cu tensiunea de alimentare anodică, o tensiune în formă de impulsuri sau o combinație oarecare a formelor de mai sus. Mai departe se vor analiza trei dintre numeroasele metode de comandă posibile.

Tabela 6. Principalele caracteristici electrice ale tiratronelor fabricate în U.R.S.S.

Tipul	Tensiunea de încălzire	Curent de încălzire	Cădere de tensiune maximă	Tensiune de aprindere maximă	Amplitudine maximă a tensiunii inverse	Valoarea maximă a tensiunii negative de blocare a grilei	Stabilitatea caracteristicilor (fabac)	Intensitatea maximă a impulsului de curent anodic (valoare de vîr)	Intensitatea maximă a curentului redresat (valoare medie)	Limitele rezistenței circuitului de grilă	Durata medie de serviciu	Cădere de tensiune după expirarea acestui termen	Stabilitatea caracteristicilor după expirarea termenului (abac)	Limitele de temperatură ale mediului ambiant	Variațiile de sursă de tensiuni la încălzire	Tempul de închidere în exploatare	Tempul de deschidere după o perioadă de păstrare
884.....	6,3	0,6	—	—	350	—	—	0,3	0,075	$10^3 - 5 \cdot 10^5$	—	—	—	de la -50 la +50	—	0,5	—
2 050.....	6,3	0,6	8	—	1 300	—	—	0,3	0,1	—	—	—	—	Idem	—	0,5	—
TT-8/3 000	5	13	25	140	3 000	18	3	8	2,5	$10^2 - 10^3$	500	30	4	de la -20 la +50	4,8-5,5	0,7	1
TT-15/2 000	5	15	12	—	2 000	—	—	15	5	$5 \cdot 10^3 - 10^5$	—	—	—	de la -15 la +45	—	—	5
TT-15/3 000	5	19	25	150	3 000	15	2,5	15	5	$10^3 - 10^5$	800	0	4	de la -20 la +60	4,8-5,5	0,7	—
TT-212.....	4	2,3	27	30	300	20	2	0,5	125	$10^3 - 10^5$	500	32	3	de la -20 la +50	3,8-4,4	1	—
TT-213.....	2,5	9,0	25	50	500	15	2	1,5	0,5	$10^3 - 10^5$	500	30	3	de la -20 la +50	2,1-2,7	0,7	1
TT-215.....	5	12,5	25	70	700	18	3	6	1,5	$10^3 - 10^5$	500	30	4	de la -20 la +50	4,8-5,5	0,7	1
TT-200.....	5	20	—	—	3 500	20	—	100	2,0	$10^3 - 10^5$	500	—	—	—	4,8-5,5	1	—

Observații. — *) La $U_g = 3 500$ V și rezistența circuitului grilei de 200 000 Ω .*) La o durată a impulsului până la 20 μ s.

Caracteristica de comandă a tiratronului desfășurată în timp constituie punctul de plecare în această examinare. În fig. 30 se arată construcția grafică după care plecând de la caracteristica de aprindere a tiratronului se poate obține desfășurarea în timp a acestei caracteristici.

Pentru fiecare valoare a tensiunii de alimentare, u , corespunde o valoare a tensiunii de grilă (tensiunea de grilă critică dată de caracteristica de comandă) pentru care tubul se aprinde, dacă potențialul de grilă trece de la o valoare mai mică la această valoare. Proiectând diferitele puncte ale curbei din fig. 30b pe caracteristica de comandă din fig. 30a și apoi prin rabaterile indicate în figură, trecând în diagrama desfășurată în timp, se poate găsi corespondența dintre tensiunile anodice instantanee și tensiunile de grilă critice instantanee. Într-un redresor monoalternanță cu o sarcină rezistivă ca în fig. 30c tensiunea anodică a tubului este egală cu tensiunea de alimentare u înainte de începerea conducerii. Prin urmare, într-un astfel de circuit se poate folosi caracteristica de comandă pentru a se determina momentul din perioada tensiunii alternative, pentru care tubul se aprinde. Momentul de aprindere corespunde punctului de pe curba caracteristică de comandă în care curba tensiunii reale a grilei se intersectează cu caracteristica de comandă. Conducția începe în acest moment și continuă până aproape de sfîrșitul alternanței, cînd tensiunea anodică devine mai mică decît căderea de tensiune pe tub. În circuitele care conțin elemente care cumulează energie (inductanțe) sau în circuitele polifazate, tensiunea aplicată efectiv tubului poate să difere de tensiunea de alimentare chiar și în timpul dinaintea aprinderii. În acest caz curba tensiunii de grilă critică trebuie să fie dedusă din curba tensiunii efective aplicată tubului.

a) Comanda închis-deschis. O metodă de comandă închis-deschis care folosește o combinație de tensiune continuă și alternativă în circuitul de grilă este arătată în fig. 31a. În acest circuit se folosește un tiratron pentru a redresa tensiunea alternativă de alimentare și pentru a da un curent redresat i_d în rezistența de sarcină R_s . Se observă că rezistențele R_1 și R_2 sînt în serie cu grila și anodul; valoarea lor trebuie să fie destul de mare pentru a limita curentul de grilă și curentul anodic. Rezistența R_2 limitează curentul care curge prin baterie, cînd se închide întrerupătorul S.

Forma de undă a tensiunii de alimentare u și curba tensiunii de grilă critică u_{gc} obținută din aceasta sînt arătate în fig. 31b; cînd întrerupătorul S este deschis, grila este legată la sursa de negativare E_g prin rezistențele R_1 și R_2 și este negativă. Dacă această tensiune negativă este mai mare decît valoarea negativă maximă a tensiunii de grilă critică, cum se arată în fig. 31b, nu curge nici un curent anodic în timpul întregii perioade, deoarece curba tensiunii critice nu este intersectată niciodată de curba de tensiune reală.

Dacă însă întrerupătorul S se închide, tensiunea de grilă u_g și tensiunea anodică u_a sînt egale și cresc împreună cu tensiunea de alimentare u . Conducția

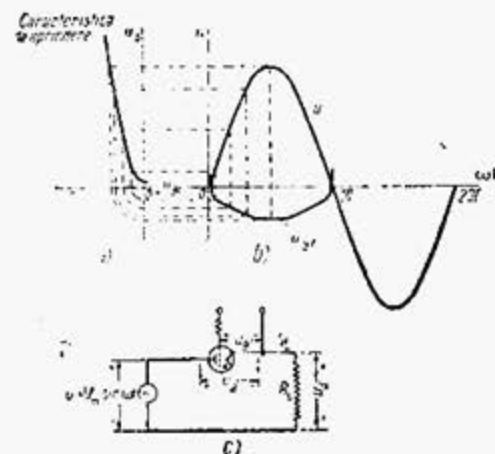


Fig. 30. — Construcția grafică pentru caracteristica tensiunii de grilă critică.

apare la unghiul α_a cind tensiunea de grilă aplicată devine egală cu tensiunea de grilă critică. La acest moment, după cum arată curbele u_a și u_g pentru S închis, curentul i_d crește brusc și atît tensiunea anodică, cît și cea de grilă scad la valori mici și rămîn aproape constante în timpul întregii perioade de conducție. Această situație durează pînă la unghiul α_s cind tensiunea de alimentare devine prea mică pentru a putea menține ionizarea și curentul se anulează brusc. Căderea de tensiune la bornele rezistenței R_s absoarbe diferența dintre tensiunea anodică și tensiunea de alimentare în timpul perioadei de conducție. Tensiunea la bornele rezistenței R_1

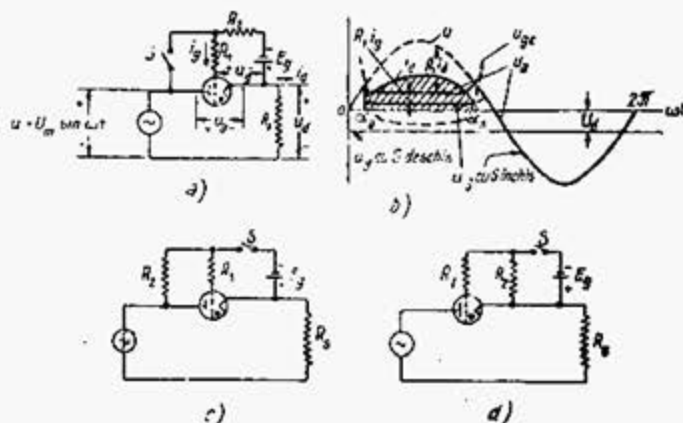


Fig. 31. - Comanda închis-deschis a curentului redresat prin tiratron.

absoarbe diferența dintre tensiunea de grilă și de alimentare. Curentul de sarcină i_d arătat prin curba care formează limita superioară a suprafeței hașurate în figură la astfel de valori, înclt căderea de tensiune pe rezistența de sarcină este egală cu diferența dintre tensiunea de alimentare și căderea de tensiune pe tub. Cind se apropie sfîrșitul perioadei de conducție, tensiunea anodică crește puțin și curentul scade repede, în timp ce tensiunea de grilă crește de asemenea pînă la curba sinusoidală pe măsură ce plasma din tub dispăre. În timpul alternanței

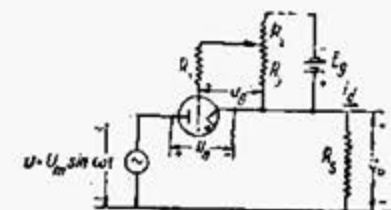


Fig. 32. - Montaj de redresare mono-alternanță (comanda continuă a curentului redresat prin reglajul tensiunii de negativare a grilei).

sare mono-alternanță pentru a produce un curent redresat în rezistența de sarcină R_s . Grila tiratronului este legată la sursa de negativare E_g prin intermediul rezistenței R_1 limitatoare de curent și un divizor de tensiune R_2 și R_3 . Oricare din ramurile divizorului de tensiune poate fi înlocuită printr-un dispozitiv (de pildă o

negative tensiunile anodului și grilei sînt ambele egale cu tensiunea de alimentare. Deci sursa de negativare E_g primește un curent de încărcare redresat. Circuitul din fig. 31c este similar cu cel din fig. 31a cu excepția că în acesta pozițiile lui S și R_2 sînt schimbate între ele. Conducția se oprește cind S este închis. În circuitul din fig. 31d comanda închis-deschis se poate obține numai prin utilizarea unei tensiuni de negativare continuă pe grilă.

β) Comandă continuă prin tensiune de negativare continuă. În circuitul din fig. 32 se folosește un tiratron într-un montaj de redresare mono-alternanță pentru a produce un curent redresat în rezistența de sarcină R_s . Grila tiratronului este legată la sursa de negativare E_g prin intermediul rezistenței R_1 limitatoare de curent și un divizor de tensiune R_2 și R_3 . Oricare din ramurile divizorului de tensiune poate fi înlocuită printr-un dispozitiv (de pildă o

fotocelulă), a cărei rezistență, de obicei neliniară, să depindă de o mărime (de exemplu o intensitate luminoasă) a cărei valoare să controleze curentul din tiratron. Rezistența limitatoare de curent trebuie să fie destul de mare pentru a evita formarea unui curent de grilă exagerat după ce tubul se aprinde. Variind valorile lui R_2 sau R_3 , sau schimbînd raportul lor, se poate regla curentul redresat din tiratron pe un interval limitat.

Comportarea circuitului pentru o anumită situație a divizorului de tensiune este ilustrată de formele de undă din fig. 33a, în care u este tensiunea de ali-

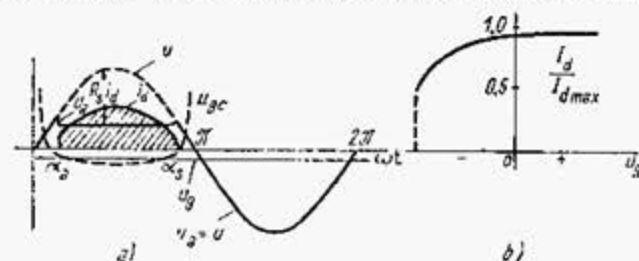


Fig. 33. - Formele de undă ale tensiunii și curentului redresat pentru circuitul din fig. 32

mentare sinusoidală, u_{gr} este tensiunea de grilă critică corespunzătoare și u_g este tensiunea aplicată grilei. Cind u_g are mărimea arătată în figură, grila devine mai pozitivă decît tensiunea critică la α_a și conducția se declanșează. Tensiunea anodică u_a scade atunci aproximativ la 10 sau 15 V și rămîne aproape constantă cît timp există curentul anodic. Curentul anodic are forma de undă indicată în figură. În alternanța negativă tensiunea anodică este egală cu tensiunea de alimentare, astfel valoarea de vîrf a tensiunii anodice inverse este egală cu amplitudinea tensiunii de alimentare.

În timpul perioadei de conducție, curentul de grilă provoacă o cădere de tensiune în rezistența din circuitul de grilă care influențează forma de undă a tensiunii de grilă u_g . Acest efect, care nu este indicat de curba u_g din fig. 33a, nu are însă vreo influență asupra formei de undă a curentului anodic, deoarece acțiunea grilei este numai de declanșare a conducției.

Din fig. 33a se vede că dacă se variază negativarea grilei printr-un mijloc oarecare, ca de exemplu reglarea rezistențelor R_2 și R_3 din divizorul de tensiune, unghiul de intersecție al curbelor tensiunilor de grilă aplicată u_g și critică u_{gr} se deplasează și astfel se schimbă unghiul de aprindere α_a . Astfel, porțiunea din perioadă în timpul căreia exista curentul anodic poate fi variată cu ajutorul tensiunii de grilă. Deoarece valoarea medie a curentului anodic este proporțională cu suprafața hașurată în fig. 33a, se vede că în modul acesta se reglează și valoarea medie a curentului redresat. Cind tensiunea de grilă are o valoare pozitivă destul de mare pentru a face ca perioada de conducție să dureze aproape întreaga semiperioadă, curentul redresat are valoarea sa maximă I_{dmax} . Pentru alte valori ale tensiunii de grilă curentul redresat are valori mai mici, indicate de curba din fig. 33b. Dacă tensiunea de grilă este egală cu valoarea maximă negativă a tensiunii de grilă critică, unghiul de aprindere este egal cu 90° și conducția nu apare decît după mijlocul alternanței pozitive. În consecință, valoarea medie a curentului redresat se reduce la aproximativ jumătate din valoarea sa maximă. Pentru valori negative mai mari ale tensiunii de grilă, conducția nu apare de loc și curba din fig. 33b scade brusc la zero, pentru această tensiune de grilă.

Dacă curba de comandă a tiratronului suferă mici modificări, acestea provoacă mari variații în curentul redresat din cauza unghiului de intersecție mic dintre curbele tensiunii u_g și u_{gc} . Deoarece caracteristicile de comandă ale tiratronului depind de presiunea gazului care variază fie cu temperatura, fie în timpul vieții tubului, această metodă de comandă nu este precisă și nici sigură. Ea este cu totul nesatisfăcătoare dacă se întrebuințează tubul cu vapori de mercur la care temperatura și presiunea vaporilor de mercur suferă mari fluctuații. Metoda de comandă prin defazarea unei tensiuni de grilă alternativă, care se va descrie

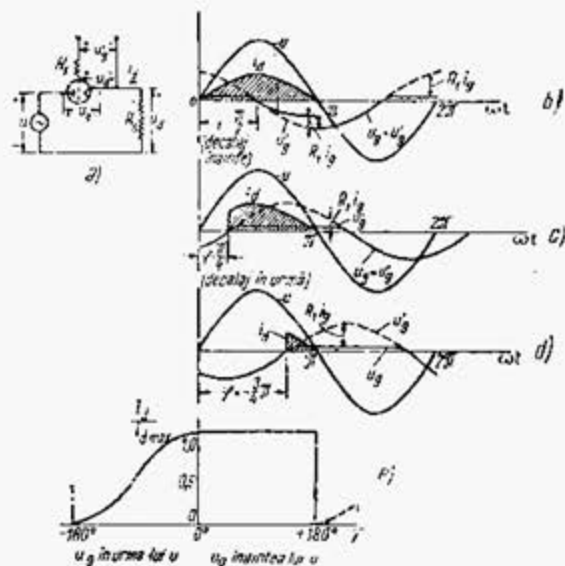


Fig. 34. - Comanda curentului redresat prin defazarea unei tensiuni de grilă alternativă.

Unghiul φ este unghiul de fază al tensiunii de grilă în raport cu tensiunea anodică, care se consideră negativ dacă tensiunea de alimentare a grilei este în urma tensiunii de alimentare anodice. În fig. 34 b, c, d se arată trei diagrame ale formelor de undă a curentului și tensiunii pentru diferite unghiuri de defazaj ale tensiunii de grilă. În fiecare din aceste figuri se fac următoarele ipoteze:

- tensiunea de grilă critică este nulă pentru orice tensiune anodică;
- tensiunea pe tub este nulă, în starea de conducție.

O tratare ceva mai exactă ar necesita introducerea valorilor instantanee ale acestor două mărimi.

În fig. 34b tensiunea de alimentare a grilei u_g este decalată înaintea tensiunii de alimentare anodice u cu 90° . Astfel tensiunea de grilă u_g devine pozitivă înaintea tensiunii anodice u și continuă să fie pozitivă în momentul cînd tensiunea anodică trece la valori pozitive. În consecință, conducția apare la începutul alternanței pozitive și durează pînă la sfîrșitul ei. O astfel de situație există nu numai pentru un decalaj de 90° , ci și pentru orice unghi de decalaj înainte al tensiunii de grilă, cuprins între 0 și 180° .

În paragraful următor, este lipsită practic de aceste dificultăți și din acest motiv se preferă în majoritatea aplicațiilor.

γ) Comandă continuă sau comandă închis-deschis, prin defazarea unei tensiuni de grilă alternativă. Cu ajutorul circuitului din fig. 34a se poate realiza o comandă continuă a curentului anodic mediu, folosind pentru excitația grilei o tensiune alternativă defazabilă. În acest circuit, atât tensiunea anodică u_a , cât și tensiunea de grilă u_g sînt alternative sinusoidale de aceeași frecvență și sînt date, de obicei, de aceeași sursă de alimentare. Un dispozitiv de defazare, care nu este arătat în figură, se intercalează între sursa de alimentare și grilă, pentru a produce între aceste tensiuni un unghi de fază φ , arătat în fig. 34.

Variația unghiului de fază al tensiunii de grilă pe un interval de la $0 - 180^\circ$ înainte nu produce prin urmare nici o schimbare a valorii medii a curentului de sarcină I_d , așa cum se vede și în fig. 34e.

Valoarea medie a curentului rămîne pentru orice unghi la valoarea maximă $I_{d \max}$.

Forma de undă a tensiunii de grilă se îndepărtează de la forma sinusoidală, așa cum se vede în figură, deoarece la începutul alternanței pozitive, tubul aflîndu-se în stare de conducție, grila absoarbe un curent de electroni din plasmă și cea mai mare parte a tensiunii u_g apare la bornele rezistenței limitatoare de curent R_1 . După ce această tensiune devine negativă la momentul $\omega t = 90^\circ$, grila absoarbe un curent de ioni pozitivi din plasmă; atunci apare o cădere de tensiune mică, dar apreciabilă, în rezistența R_1 pînă cînd conducția încetează și începe deionizarea.

În fig. 34c tensiunea u_g este decalată în urma tensiunii u cu 45° . În partea de la începutul perioadei, tensiunea de grilă este negativă, deci curentul de grilă i_g este neglijabil și tensiunea de grilă u_g este egală cu tensiunea de alimentare a grilei u_g' . Deoarece tensiunea de grilă este negativă, tubul nu poate conduce. Cînd grila devine pozitivă la momentul $\omega t = 45^\circ$ din perioada tensiunii de alimentare, curentul anodic crește brusc și urmează o variație sinusoidală pentru restul perioadei. În mod analog cu situația din fig. 34b majoritatea tensiunii de alimentare a grilei este absorbită de rezistența grilei, atît timp cît tensiunea u sau tensiunea u_g' sînt pozitive. Cînd tensiunea u_g' devine negativă, tensiunea u_g are forma apropiată de o curbă sinusoidală, deoarece atunci curentul de grilă este foarte mic. Efectul decalajului de fază în urmă al tensiunii de grilă este de a întârzia începerea conducției cu un interval de timp corespunzător unghiului de decalaj.

Cum se arată în fig. 34d, unghiuri de decalaj mari reduc treptat valoarea medie a curentului anodic la zero, pe măsură ce unghiul de decalaj se apropie de 180° .

Din aceste considerații, este evident că curba curentului de sarcină mediu I_d , în funcție de decalajul tensiunii de grilă, are forma din fig. 34e. Din cauza saltului brusc care apare la poziția de 180° , o metodă de defazaj, care variază faza tensiunii de grilă cu un unghi mic în jurul lui 180° , dă o comandă cu caracterul închis-deschis.

Numai un decalaj de la $0 - 180^\circ$ în regiunea decalajului în urmă, oferă o comandă continuă a curentului redresat. Relația care leagă valoarea medie a curentului de unghiul de decalaj în regiunea de comandă continuă se poate obține cu aproximație în felul următor:

Cînd unghiul de fază este nul sau capacitiv, forma de undă a curentului anodic este o jumătate de sinusoidă și curentul mediu are valoarea maximă dată de:

$$I_{d \max} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_d \cdot d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \int_0^\pi \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}, \quad (25.1)$$

în care I_m este valoarea maximă a curentului redresat i_d . Cînd unghiul de fază este inductiv, limita inferioară a integralei este $(-\varphi)$, acest semn minus fiind

necesar, deoarece φ însuși este un număr negativ. Atunci valoarea medie a curentului scade și este dată de:

$$I_d = \frac{I_m}{2\pi} \int_{-\varphi}^{\pi} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \varphi) = \frac{I_m}{\pi} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (25.2)$$

Pentru un decalaj oarecare inductiv φ , raportul dintre valoarea medie a curentului către valoarea maximă posibilă a curentului mediu este:

$$\frac{I_d}{I_{d \max}} = \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (25.3)$$

Din această relație, cum și din diagrama din fig. 34e se vede că sensibilitatea de reglaj maximă se obține pentru $\varphi = -90^\circ$.

Trebuie menționat că relația (25.3), după care s-a trasat curba din fig. 34e, se bazează pe ipoteza unei căderi de tensiuni neglijabile pe tub în timpul conducției și o tensiune de grilă critică, aproape nulă. Dacă aceste două mărimi nu sînt neglijabile, deosebirile care intervin sînt următoarele:

- valoarea de vîrf a curentului anodic scade;
- conducția apare mai devreme în alternanța pozitivă;
- curentul scade la zero pentru un unghi mai mic decît 180° .

Dacă sarcina din circuitul anodic nu este o rezistență pură, ci conține o inducțanță în serie sau o capacitate în paralel, curba din fig. 34e nu mai este valabilă și analiza unui redresor monoalternanță cu grila comandată trebuie făcută după metoda care se va vedea în § 63-65.

8) *Alte metode.* Uneori, în redresoarele comandate pe grilă se folosesc și alte metode în afară de cea simplă a defazării. De exemplu, tensiunea aplicată efectiv pe grilă poate să varieze, atît ca amplitudine, cît și ca fază, sau să fie compusă dintr-o tensiune alternativă și una continuă, sau să fie o tensiune în formă de impulsuri foarte ascuțite.

Metode de defazaj. Una dintre cele mai satisfăcătoare metode pentru obținerea unei tensiuni alternative de fază variabilă este utilizarea unui dispozitiv de defazare avînd un stator polifazat și un rotor monofazat. Cînd statorul se alimentează cu un sistem de curenți polifazați și rotorul se ține în repaus unghiul de defazaj dintre tensiunea indusă în bobinajul rotorului și tensiunile statorului variază cu poziția rotorului și se obține astfel o tensiune de fază reglabilă prin reglarea mecanică a poziției rotorului. Totuși, un astfel de defazor nu constituie, de obicei, metoda cea mai economică, astfel încît s-ar putea să fie preferabile circuite de defazare formate din punți.

În astfel de punți, se obține o tensiune de comandă de amplitudine constantă și fază variabilă, în funcție de variația unei rezistențe sau a unei inducțanțe, cu miez saturabil.

E. Date tehnice privind tuburile cu gaz

26. *Datele nominale ale tuburilor cu gaz.* Puterea care poate fi trecută printr-un tub cu gaz cu catod cald depinde de tensiunea și de curentul pe care tubul le poate suporta fără deteriorare. Limitarea tensiunii se impune din cauza posibilității apariției unei descărcări cu luminescență între grilă și anod. Dacă descărcarea cu luminescență apare, se produce pierderea proprietății de comandă a grilei, din cauza

unui strat de ioni pozitivi care se formează în jurul grilei. Limitarea curentului se impune din cauza pericolului de încălzire exagerată a anodului și din cauza bombardamentului ionilor pozitivi pe catod, care poate distruge catodul.

Tensiunea inversă de vîrf maximă este tensiunea anodică negativă instantanee maximă care poate fi aplicată tubului fără să se producă un arc invers, adică străpungerea spațiului anod-catod în sensul invers conducției normale prin tub.

Această tensiune depinde de materialul din care sînt construiți electrozii, de presiunea gazului sau vaporilor de mercur și deci de temperatura vaporilor de mercur, de ionizarea reziduală din tub, care, la rîndul ei, depinde de frecvența tensiunii de alimentare anodică și de curentul total care a existat în perioada de conducție.

Tensiunea directă de vîrf maximă este tensiunea anodică pozitivă instantanee maximă pentru care acțiunea grilei de a evita aprinderea mai este posibilă.

La tensiuni mai mari, apare o descărcare cu luminescență între anod și grilă. Grila pierde proprietățile de comandă și între anod și catod se formează un arc.

Curentul anodic instantaneu maxim este curentul periodic instantaneu cel mai mare pe care tubul îl poate suporta în condiții de funcționare normale, fără să se deterioreze din cauza supraîncălzirii sau fără ca să se distrugă catodul din cauza bombardamentului ionilor pozitivi. Intervalul de timp în care un tub dat poate suporta acest curent instantaneu sau frecvența la care tubul poate să suporte un impuls de curent instantaneu de o anumită durată depind de încălzirea tubului.

Curentul anodic de impuls maxim arată capacitatea tubului de a rezista la curenții tranzitorii foarte mari.

Această dată nominală se intenționează să se ia ca bază în proiectarea circuitului pentru a limita curenții anormali care apar în timpul unui scurtcircuit. Tubul nu poate însă să fie supus în mod repetat la scurtcircuite, fără probabilitatea unei reduceri corespunzătoare a vieții sale și posibilitatea distrugerii sale.

Curentul anodic mediu maxim este data nominală pe care se bazează încălzirea tubului. El reprezintă curentul mediu anodic cel mai mare care poate fi purtat de tub în mod continuu. În cazul unei funcționări cu ciclu de repetiție rapid, acest curent poate fi măsurat cu un ampermetru de curent continuu. Altfel este necesar să se calculeze curentul mediu pe o perioadă, care să nu depășească un anumit interval de timp, care se specifică de obicei pentru fiecare tip de tub. De exemplu, un tub cu un curent anodic instantaneu maxim de 15 A, un curent anodic mediu maxim de 2,5 A și o perioadă de luare a mediei de 15 s, poate purta un curent de 15 A timp de 2,5 s la fiecare interval de 15 s sau un curent de 7,5 A timp de 5 s la fiecare interval de 15 s.

Datele nominale pentru curentul de grilă sînt curentul de grilă instantaneu maxim și curentul de grilă mediu maxim pentru care timpul de luare a mediei este același ca pentru curentul anodic.

Căderea de tensiune pe tub este tensiunea dintre anod și catod în condiții normale de conducție a curentului anodic. Se reprezintă, fie prin simbolul U_a , fie prin ΔU_a . Căderea tensiunii pe tub variază cu temperatura în tuburile cu vapor de mercur.

Timpul de deionizare exprimat în microsecunde este timpul necesar în condiții normale de funcționare pentru a produce o suficientă deionizare, pentru ca grila de comandă să-și recapete proprietățile. Acest timp se bazează pe un curent anodic mediu maxim și (la tuburile cu vapor de mercur) pe o temperatură a mercurului de 40°C . El scade cînd temperatura sau curentul anodic scad. Acest factor este foarte important în multe circuite, dar datorită faptului că el depinde de temperatura tubului, de rezistența circuitului de grilă și de alți factori, cifra care se indică pentru timpul de deionizare trebuie privită numai cu titlu informativ.

Caracteristica de comandă a tubului, sau caracteristica de aprindere este curba care reprezintă relația dintre tensiunea anodică și tensiunea critică de grilă pentru care se produce aprinderea tubului. Această caracteristică este și ea influențată de temperatura tubului.

Limitele de temperatură. Se fixează o limită superioară și o limită inferioară pentru temperatura tubului, măsurată la partea inferioară a recipientului, unde se află mercurul condensat. Dacă se depășește limita superioară, scade tensiunea inversă pe care o poate suporta tubul și se pot produce arcuri inverse. Dacă temperatura scade sub limita inferioară, crește căderea de tensiune pe tub, care dacă se apropie de valoarea potențialului de dezintegrare, provoacă distrugerea catodului.

În tuburile cu vapori de mercur, intervalul de temperatură este de obicei 30–80°C, sau aproximativ 20–60°C ridicare de temperatură față de mediul ambiant.

Dacă limitele de temperatură nu se pot menține, din cauza temperaturii mediului ambiant, trebuie introdusă o încălzire sau o răcire forțate.

27. Precauții speciale în cazul utilizării tuburilor cu gaz. Din cauza caracteristicii tuburilor cu gaz, la utilizarea lor trebuie luate precauții speciale, fără de care tubul se poate distruge.

— Catodul tubului trebuie adus la temperatura normală de funcționare, înainte de aplicarea tensiunii anodice. Dacă nu se respectă această precauție, rezultă o cădere de tensiune catodică exagerată și dezintegrarea catodului.

— Tuburile cu vapori de mercur trebuie încălzite un timp suficient, pentru ca vaporii să capete presiunea normală. Un timp de încălzire mai lung este necesar dacă mercurul se află pe pereții balonului și pe electrozi.

— În circuitul anodic trebuie să existe o impedanță de valoare suficientă pentru a limita atât curentul instantaneu maxim, cât și curentul anodic mediu la valorile nominale.

Dacă nu se respectă aceste precauții, catodul se poate dezintegra, sau anodul se poate supraîncălzi.

— În circuitul de grilă trebuie să existe o rezistență suficient de mare pentru a limita curentul instantaneu maxim și curentul mediu la valorile nominale. Un curent de grilă exagerat poate distruge prin încălzire grila, sau firele de legătură ale grilei. Dacă rezistența limitatoare lipsește din circuitul de grilă și un arc se formează între grilă și catod, curentul poate lua o valoare atât de mare, încât grila să se topească, sau încălzirea firelor de legătură ale grilei să deterioreze etanșarea tubului și aerul să intre în tub.

— Se recomandă utilizarea de siguranțe fuzibile, în serie cu sursele de alimentare ale anodului și grilei.

F. Tuburi redresoare cu arc de mercur (cu catodi din mercur)

28. Fenomene generale. α) **Formarea arcului de mercur.** Când se cere curent mare, se utilizează în tuburile cu gaz o baie de mercur cu rol de catod. Deoarece baia de mercur nu este prin ea însăși o sursă de electroni, este necesar un mijloc oarecare pentru a declanșa arc în tub. O dată declanșat arc într-un astfel de tub, se concentrează pe o mică pată luminoasă care se mișcă dezordonat pe suprafața băii de mercur. Catodul din mercur servește deci unui scop dublu. El nu furnizează numai electronii dar și vaporii de mercur prin care se produce conducția curentului. Acest fel de catod se reface singur deoarece tubul poate fi astfel construit, încât vaporii de mercur rezultați din catod prin încălzirea produsă de arc să se reîntoarcă după condensare la baia de mercur. Aici nu se pune problema dezintegrării catodului, astfel încât se poate admite un curent de o valoare instantanee foarte mare

fără ca tubul să se distrugă. Pata catodică formată de arc la suprafața mercurului este o sursă cu o densitate de curent electronic foarte mare. Se apreciază că această densitate este de aproximativ 4 000 A/cm². Când curentul total este mare, se formează mai multe pete pe suprafața băii de mercur, fiecare purtând 30–40 A. Fenomenul care dă naștere unei emisii de electroni atât de bogate nu este bine lămurit. Emisia termoionică se crede că joacă un rol secundar în eliberarea electronilor, deoarece temperatura petei catodice la suprafața unui conductor cu conductivitate termică așa de bună, cum este mercurul, nu poate să fie destul de ridicată, dat fiind că puterea cheltuită pentru încălzire nu este mare. Ultimele cercetări arată o temperatură de numai 250–350°C, spre deosebire de cifra care se credea în trecut. Pe de altă parte, debitul de evaporare al mercurului nu este suficient de mare încât să indice existența unei temperaturi ridicate. Bombardarea produsă de ionii pozitivi de tensiune relativ mică se crede că este un proces cu totul ineficace pentru a juca un rol important în emisia electronilor. Într-un astfel de tub se formează o plasmă și un strat de ioni pozitivi ca la gazotron. Distribuția potențialului în arc este arătată în fig. 35. Se crede că în urma acestei distribuții de potențial cîmpul electronic la suprafața catodului este suficient de mare pentru a extrage electronii din metalul lichid printr-un proces de emisie de cîmp intens.

β) **Compunerea arcului de mercur.** Arcul în tubul cu baie de mercur se poate împărți în trei regiuni: *stratul catodic* (sau stratul de ioni pozitivi de la suprafața catodului) corespunzând regiunii OA din fig. 35, *plasma* corespunzând regiunii AB, și *stratul anodic* (sau stratul de electroni din jurul anodului), reprezentat în regiunea BC. Stratul catodic este în fond același ca într-un gazotron. El se compune din ionii pozitivi, care se deplasează din plasmă spre catod și din electronii care se mișcă în sens invers. Deși curentul de electroni este mai mare decât curentul de ioni pozitivi, electronii au un efect neglijabil asupra sarcinii spațiale din strat. Căderea de tensiune catodică se găsește în jurul a 9,9 eV pentru un mare interval de curenți și presiuni. Deoarece travaliul de emisie al mercurului este 4,5 eV, iar electronii eliberați în procesul de emisie de către un cîmp intens se obțin la un nivel de energie foarte apropiat de nivelul de energie internă al metalului, după emisia electronului rămân disponibili doar: 9,9–4,5, sau 5,4 eV pentru a accelera electronii și a le da energia cinetică necesară ionizării vaporilor de mercur. Faptul că această tensiune este mai mică decât potențialul minim de ionizare arată că ionizarea se produce printr-o serie de ciocniri multiple. Când valoarea curentului scade, predomină totuși ionizarea prin ciocnire unică și căderea de tensiune crește când curentul scade.

Plasma în arc de mercur, ca și în gazotron, este o regiune în care cîmpul electronic este foarte scăzut. Din acest motiv, ionii pozitivi și electronii există în număr aproximativ egal, iar cîmpul electronic are o valoare cuprinsă între 0,05–0,2 V/cm la presiunile de funcționare și densitățile de curent obișnuite. Plasma are rolul unei căi de mare conductivitate pe cea mai mare parte a lungimii arcului. Datorită mișcărilor dezordonate ale electronilor din plasmă, electronii tind să lovească anodul cu un ritm rapid. Dacă acest ritm este suficient pentru a furniza curentul anodic din circuit, plasma se întinde pînă la anod. Dacă curentul anodic este mai mare decât această valoare, apare o regiune BC din fig. 35 care indică o creștere a cîmpului electric în apropierea anodului, care ajută la extragerea electronilor din plasmă. Această regiune cu cîmp mărit este stratul anodic. În acest strat se găsesc foarte puțini ioni



Fig. 35. — Distribuția potențialului în arc de mercur.

1 — cădere de tensiune catodică;
2 — cădere de tensiune pe plasmă;
3 — cădere de tensiune anodică;
4 — tensiune aplicată.

pozitivi pentru că sensul cimpului electric se opune mișcării lor din plasmă către anod. Deci stratul anodic este o regiune în care există o sarcină spațială de electroni. Căderea de tensiune anodică de-a lungul acestui strat este cauza principală a creșterii căderii de tensiune totale pe arc, la curent mare. Fig. 36 reprezintă mai multe curbe ale căderii de tensiune totale în funcție de curentul din tub și de temperatura vaporilor de mercur. Se vede că, în medie, pentru intervalul normal de funcționare, această cădere de tensiune este de ordinul 25 V. Creșterea tensiunii la curenți mici se datorește în primul rând creșterii căderii de tensiune catodice, iar creșterea la curenți mari provine din creșterea căderii de tensiune anodice.

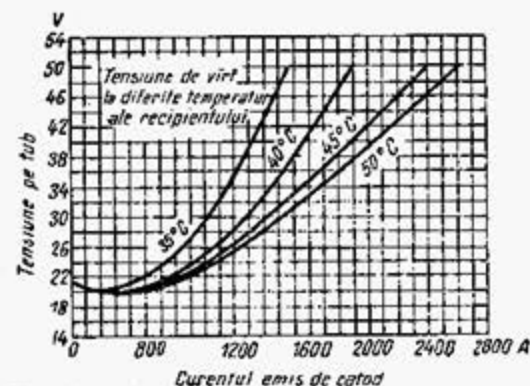


Fig. 36. — Căderea de tensiune pe arc în tub redresor cu arc de mercur.

În căldură la locul petei catodice, mercurul se poate evapora repede la suprafața băii. Mișcarea dezordonată a petei pe suprafața băii de mercur se atribuie presiunii ridicate a vaporilor în regiunea petei. Pentru a menține o presiune scăzută în interiorul tubului și a admite în consecință o tensiune inversă mare, vaporii de mercur trebuie să se condenseze de îndată ce s-au produs. Această condensare se produce fie prin răcire cu aer a unei camere de condensare din sticlă, fie prin răcirea cu apă a pereților unui recipient din oțel. Debitul cu care se poate condensa mercurul este un factor important de limitare a curentului mediu din tub.

a) Redresoare polianodice cu arc de mercur

29. Generalități. În toate tuburile redresoare care folosesc catodi formați dintr-o baie de mercur, trebuie prevăzut un mijloc oarecare pentru amorsarea arcului, fiindcă el nu se poate amorsa doar prin simpla aplicare a tensiunii anodice normale. În afară de aceasta, la anumite metode de amorsare, trebuie prevăzută posibilitatea menținerii arcului, deoarece el se stinge brusc dacă intensitatea curentului scade aproximativ sub un amper. În general, se prevede un electrod oarecare de pornire (aprindere sau excitație) care face să apară arc la suprafața băii de mercur, după care el trece la anodul principal.

Redresoarele cu catodi din mercur, care se vor descrie în acest subcapitol, se caracterizează prin mijloacele întrebunătate pentru pornirea arcului și menținerea lui în mod continuu când o tensiune alternativă se aplică anodului.

Tipurile vechi de redresoare cu arc de mercur sînt construite în recipiente de sticlă. Avantajul sticlei este că, pereții fiind izolați, legăturile la electrozi pot fi făcute prin borne sigilate și astfel se poate menține în recipient un vid permanent.

Redresoarele în recipiente de sticlă se construiesc cu mai mulți anodi, cel mult șase, și uneori au trei anodi de excitație. Dezavantajul acestor redresoare este răcirea dificilă și rezistența mecanică slabă. Ele se limitează la 500 A și 500 V, funcționare continuă.

Redresoarele cu recipient metalic s-au construit pentru a înlătura dezavantajele redresoarelor cu recipient din sticlă. Ele se construiesc cu 6, 12 sau 18 anodi. Capacitatea lor poate merge pînă la 9 000 kW, au tensiuni cuprinse între 200–3 000 V. Numărul mare de anodi este necesar pentru a produce o tensiune redresată mai netedă; anozii sînt alimentați de un transformator avînd în secundar 6, 12 sau mai multe faze.

Redresorul cu arc de mercur are o capacitate de curent mult mai mare decît tubul cu catod termoionic, care se limitează de obicei la 75–100 A/tub. Tensiunile inverse sînt însă mai mici la redresorul cu arc de mercur, din cauza dificultăților de a menține vidul necesar în recipientul metalic al redresorului; la tipurile obișnuite se limitează tensiunea la 3 000 V, pe cînd la gazotron se merge pînă la 15 000 V.

Totuși, în tehnica modernă s-au putut construi tipuri speciale de redresoare care merg pînă la 20 000 V tensiune inversă.

30. Redresoare în recipiente de sticlă. a) Descriere generală. Un redresor în vas de sticlă se compune din următoarele părți: domul de condensare cu baia catodică, brațele cotite ale anozilor principali, brațele anozilor de excitație și brațul anodului de aprindere (fig. 37). Aceste părți sînt furnizate separat de fabrica de sticlă și sînt apoi sudate. Pentru ca tensiunile din sticlă produse în timpul sudării să fie anihilate, se încălzește vasul într-un cuptor și se răcește apoi foarte încet. Vidul se face punînd vasul în comunicație cu un grup de pompe de vid, înlocuind ca și la mutatoarele cu cuvă metalică. Mercurul este introdus în vas prin distilare pentru a fi lipsit de impurități. În timpul efectuării vidului, redresorul este pus să debiteze timp de mai multe ore pentru ca gazele incluse în mercur și în anodi să fie evacuate. În acest scop, redresorul este introdus într-un cuptor, la temperatura de mai multe sute de grade și este încălzit cu o suprasarcină de 50 % timp de 24 de ore. Redresoarele la care gazele nu au fost suficient evacuate arată după un timp de funcționare o creștere a presiunii și pot suferi din cauza aprinderilor inverse.

Măsurarea vidului în timpul formării se face indirect cu ajutorul unui transformator Tesla de înaltă frecvență și înaltă tensiune. După tensiunea care provoacă descărcarea se poate deduce valoarea presiunii din redresor.

Principalul avantaj al redresoarelor cu vas de sticlă este simplitatea construcției din care rezultă și ieftinătatea lor. Lipsesc izolatoarele, sticla fiind ea însăși un izolanț; lipsesc garniturile, electrozii fiind sudați direct de sticlă; lipsesc și pompele de vid și aparatele de măsurat vidul, deoarece sticla este un material etanș.

β) Dispozitive de aprindere și excitație. Dispozitivele de aprindere și excitație sînt diferite după constructor; se vor trece în revistă cele mai cunoscute.

Dispozitiv cu anod de aprindere mobil (fig. 38). Anodul de aprindere este așezat într-un braț orizontal al recipientului de sticlă, la un

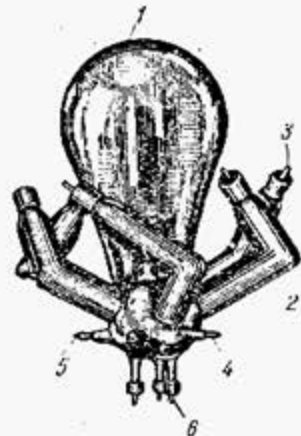


Fig. 37. — Redresor în recipient de sticlă:
1 — domul de condensare;
2 — brațe cotite pentru anozii principali;
3 — anozii de excitație;
4 — anodul de aprindere;
5 — legătura la catod.

nivel puțin mai ridicat decât catodul de mercur. Brațul anodului are o armătură care este atrasă de electromagnetul 9, de îndată ce transformatorul 5 de excitație și aprindere este pus în funcțiune. Capătul anodului de aprindere intră în mercur și prin aceasta bobina electromagnetului 9 este pusă în scurtcircuit. Curentul în circuitul de aprindere este limitat prin rezistența 10. Un resort 4 care susține

țija de aprindere trage anodul de aprindere în sus iar în momentul când anodul părăsește suprafața mercurului se produce un arc electric.

Atmosfera din redresor se ionizează și anozii de excitație se aprind. Curentul de excitație trece prin releul 11, armătura sa este atrasă și se întrerupe circuitul anodului de aprindere. Dacă anozii de excitație nu se aprind, se stabilește contactul circuitului de aprindere și procesul se repetă de mai multe ori până ce anozii auxiliari intră în funcțiune.

Dispozitiv de aprindere prin înclinarea vasului. Vasul de sticlă are un anod de aprindere care poate veni în contact cu mercurul din baia catodică atunci când vasul este înclinat. La restabilirea poziției inițiale contactul între anodul de aprindere și catod se desface, apare arcul care determină aprinderea anozilor auxiliari.

Dispozitiv de aprindere cu țîșnitură de mercur (fig. 39). În interiorul băii catodice se află cufundat în

mercur un cilindru cu un piston 1 din material magnetic. Deasupra suprafeței de mercur se află anodul de aprindere 2. O bobină de aprindere 3 este așezată sub baia catodică. Ea este alimentată cu curent în momentul când trebuie să se facă aprinderea. Pistonul este atras de bobină și mercurul este împins în forma unei țîșnituri în sus și lovește anodul de aprindere. Se formează astfel arcul și pata catodică care determină apoi aprinderea anozilor auxiliari.

Dispozitiv cu anod de aprindere fix (fig. 40). Între poli unui electromagnet se află un tub cu legătură directă cu catodul de mercur. Tubul este pe jumătate plin cu mercur. La capătul tubului se află în contact cu mercurul un electrod 1. Când redresorul nu funcționează, releul de aprindere 2 stabilește contactul la anodul de aprindere 1. Prin punerea în funcțiune a transformatorului de aprindere se provoacă un curent în electromagnet. Vîna de mercur prin care trece curentul este supusă unei acțiuni electrodinamice din cauza cîmpului provocat de magnet, se produce o secționare bruscă a vînei de mercur și apare arcul electric care ionizează spațiul înconjurător astfel încît anozii de excitație se aprind. Îndată ce anozii de excitație, alimentați de transformatorul N, încep să debiteze curent continuu, acest curent se închide prin o a doua înfășurare a electromagnetului 3 și trece și prin releul 2 pe care îl face să funcționeze.

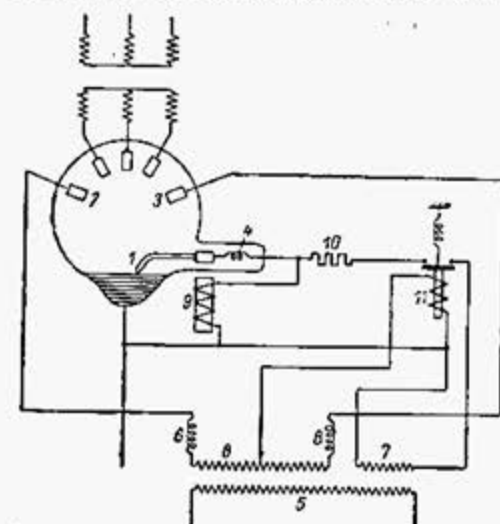


Fig. 38. — Dispozitiv cu anod de aprindere mobil: 1 — anodul de aprindere; 2 și 3 — anozii de excitație; 4 — arc de moliuden; 5 — transformator de aprindere și excitație; 6 — reactanță pentru anozii de excitație; 7 — înfășurarea secundară pentru aprindere; 8 — înfășurarea secundară pentru excitație; 9 — electromagnet; 10 — rezistența de limitare; 11 — releu de întrerupere.

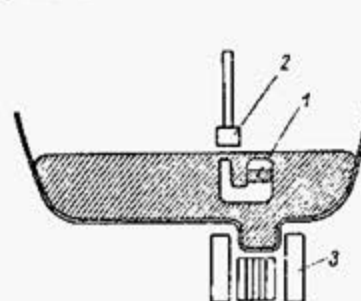


Fig. 39. — Dispozitiv de aprindere cu țîșnitură de mercur: 1 — piston; 2 — anodul de aprindere; 3 — bobine de aprindere.

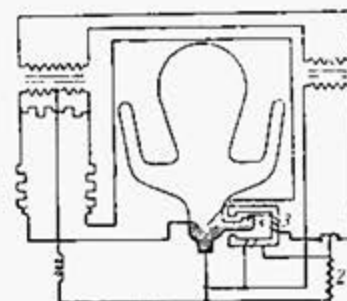


Fig. 40. — Dispozitiv cu anod de aprindere fix: 1 — electrod; 2 — releu de aprindere; 3 — electromagnet.

Tabela 7. Caracteristicile redresoarelor cu arc de mercur în recipiente de sticlă fabricate în U.R.S.S.

Tipul	Numărul anozilor		Curent mediu pe catod		Tensiune inversă admisibilă V	Curentul pe anozii auxiliari A	Durata de serviciu h	Sistemul de răcire
	Principali	Auxiliari	max A	min A				
2B-6	2	—	6	3,5	500	—	1 000	naturală
4B-6	2+2	—	6	3,5	500	—	1 000	idem
			1	0,05	1 000	—		
2B-12	2	—	12	4	1 500	—	1 000	idem
2BH-12	2	2	12	0,6	1 500	5-7	1 000	idem
2B-20	2	—	20	5	1 500	—	1 000	idem
2BH-20	2	2	20	1	1 500	5-7	1 000	idem
3B-30	3	—	30	5	1 500	—	1 000	idem
3BH-30	3	2	30	1,5	1 500	5-7	1 000	idem
3BH-60	3	2	60	3	1 200	5-7	800	ventilator
3BH-100	3	2	100	5	1 200	5-7	800	idem
3BH-A-3000	3	2	4	0,5	1 700	5-7	800	idem
3BH-6-15000	3	2	6	0,5	15 000	5-7	800	idem

31. Redresoare în recipiente metalice. a) Generalități. Pentru intensități mai mari de 500 A, construcția redresoarelor cu vas de sticlă întâmpină dificultăți mari din cauza imposibilității de a se construi vase de dimensiuni mari care să nu fie fragile.

De aceea se construiesc redresoare cu cuvă metalică folosite obișnuit pentru intensități între 1 000 și 10 000 A. S-au făcut încercări pentru intensități de 16 000 A; totuși unitățile foarte mari nu au dat rezultate bune. Din cauza dimensiunilor mari ale cuvei crește și lungimea arcului și deci și căderea de tensiune în arc, ceea ce are o influență defavorabilă asupra randamentului. Când este nevoie de intensități importante, este mai bine ca în loc de unități extrem de mari să se

folosească mai multe unități de mărime mijlocie, de exemplu de 6 000 A. Detaliile constructive ale redresoarelor depind de uzinele constructoare. În fig. 41, 42, 43 și 44 se dau secțiuni prin două tipuri constructive.

Pentru că redresoarele cu cuvă metalică sînt utilizate pe o scară mare, se vor arăta detalii de construcție ale diverselor părți și accesoriilor.

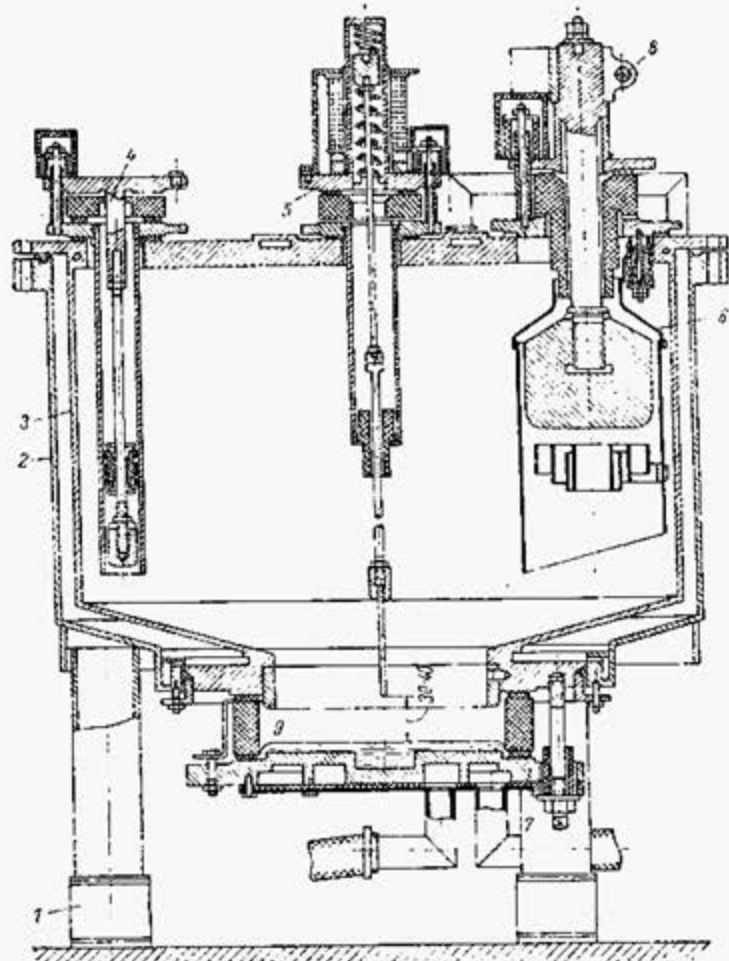


Fig. 41. — Secțiune prin redresorul RMNV-1000:

1 — izolator de susținere; 2 — soclu; 3 — corpul; 4 — anodul de excitație; 5 — anodul de aprindere; 6 — anodul principal; 7 — catodul; 8 — radiatorul; 9 — ceram.

β) *Cuva metalică.* După forma exterioară a cuvei, redresoarele se deosebesc: în construcții cu și fără dom pentru condensarea mercurului. Vaporii de mercur se condensează în dom pentru că acest spațiu este bine răcit și este îndepărtat de locul unde se produce căldură (catod, anodi și arc electric).

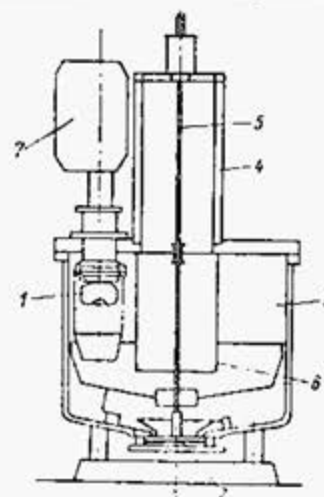


Fig. 42. — Secțiune prin edresorul BBC:

1 — anod de grafit; 2 — catod de mercur; 3 — cuvă metalică; 4 — câmășă de răcire; 5 — tije de aprindere; 6 — cilindru din tablă pentru ghidajul arcului; 7 — radiator cu aripioare.

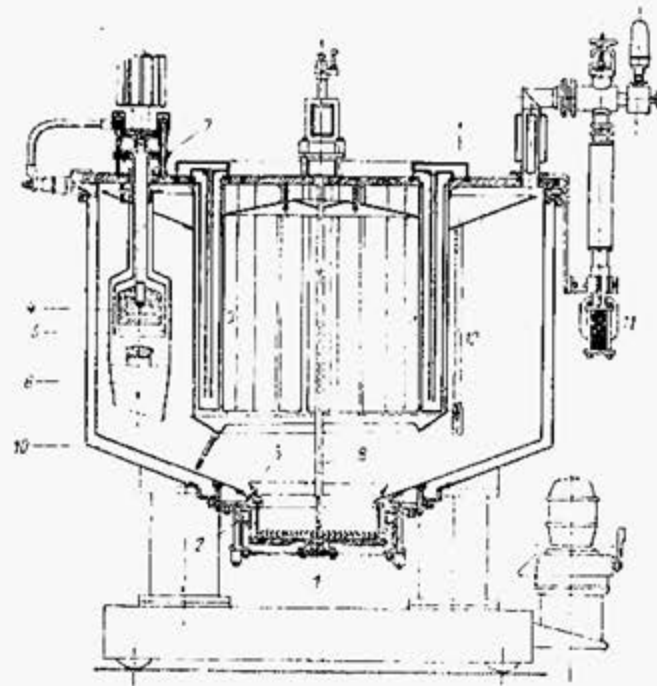


Fig. 43. — Secțiune prin redresorul AEG:

1 — catod; 2 — inel intermediar răcit cu apă; 3 — brida inferioară a cuvei redresorului; 4 — anod; 5 — grilă de comandă; 6 — tub de protecție al anodului; 7 — borna grilei de comandă; 8 — anod de aprindere; 9 — răcitor intern; 10 — mediu de răcire; 11 — pompă de vid înalțat cu vapori de mercur; 12 — anod de excitație.

Construcțiile care nu au dom utilizează spațiul central între anozii pentru condensarea mercurului. Sistemul de răcire este compus din țevi prin care circulă apa.

Răcirea interioară prezintă avantajul micșorării probabilității de a se ivi aprinderi inverse pentru că se produce o condensare a norilor de vapori de mercur care se degajă brusc în timpul funcționării mutatorului. Cuva, în partea superioară,

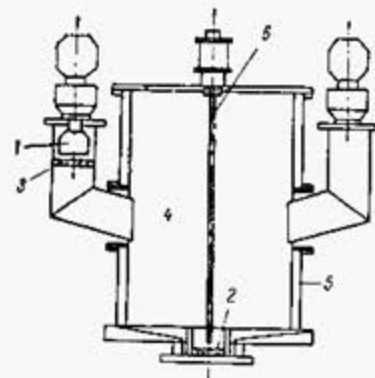


Fig. 44. - Secțiune prin redresorul Ceschomansk-Kolben-Danek:

1 - anod de grafit; 2 - catod de mercur; 3 - ecran de protecție; 4 - cuvă metalică; 5 - cămășă de răcire cu apă; 6 - anod de aprindere.

răcire. Apa se răcește în radiatoare așezate deasupra cuvei. La construcțiile mai noi de redresoare se întrebuințează anozii din grafit, care au proprietatea de a degaja căldura prin radiație.

Anozii din grafit pot suporta suprasarcini mari fără a se topi și fără a fi deteriorați într-un fel oarecare. Degazarea anozilor de grafit se poate face mai complet decât a anozilor din oțel.

Dispozitivele anexe anozilor, indicate mai departe, au un rol însemnat, împiedicând aprinderile inverse (fig. 45 și 46):

În jurul fiecărui anod se așază o teacă cilindrică de protecție din oțel care are ca scop de a împiedica căderea picăturilor de mercur pe anozii. Se evită astfel o mărire locală a densității vaporilor de mercur. De asemenea, tecele mai au ca scop protejerea anozilor contra radiațiilor ultraviolete care se produc la catod și în arc.

De teci sunt fixate grilele nepolarizate. Aceste grile împreună cu tecile au ca efect o delonizare a spațiului din jurul anozilor, stabilind condiții de funcționare favorabile.

De izolările anozilor în interiorul tecilor de protecție se fixează grilele polarizate sau de comandă, care pot fi utilizate și pentru delonizare și pentru a regla momentul aprinderii arcului. Grilele servesc și drept organ de protecție, putând determina stingerea arcului în cazul când se produce o aprindere inversă.

8) Catodul. Catodul este un recipient de metal, cuprinzând mercurul; el este montat izolat la partea inferioară a redresorului. Este răcit extrem de intens pentru că este sediul unei degajări mari de căldură.

În unele construcții, catodul este înconjurat în interior cu cilindri de cuarț care au drept scop o izolare termică astfel ca să nu se propage căldura în părțile

are legătură printr-o conductă cu pompele de vid. La începutul acestei conducte se găsește robinetul de închidere care poate separa etanș cuva redresorului de pompele de vid. Redresoarele sunt expediate din fabrică cu vidul făcut și complet formate.

În partea superioară a domului sau a capacului cuvei se găsește dispozitivul de aprindere. Acest dispozitiv poate fi demontat fără a se scoate capacul redresorului. Cuvă este susținută de picioare care sunt izolate, pentru că ea nu trebuie în nici un caz să fie conectată cu pământul chiar la instalațiile în care polul pozitiv este legat la pământ.

γ) Anozii. La primele redresoare construite, anozii sunt din oțel. Pentru a se evita aprinderile inverse, este esențial ca anozii, care se încălzesc în timpul funcționării, să fie răciți energic. Răcirea se face prin radiatoare cu aripi fixate de tija anodului, în exteriorul cuvei. În unele construcții, anozii sunt găuriți în interior pentru circulația apei de răcire.

În jurul catodului se pun inele de curățire în scopul de a opri ca murdăriile care se formează în timpul funcționării să fie antrenate prin picăturile de mercur care intră în baia catodică.

În alte construcții s-a încercat să se imobilizeze pata catodică, care în mod obișnuit este într-o mișcare continuă. Avantajul acestei imobilizări este reducerea cantității de mercur necesară a se evapora pentru a face posibilă funcționarea mutatorului. Pe de altă parte, rezultă și pierderi mai mici în arc. Mijlocul întrebuințat pentru imobilizarea petei catodice este așezarea unei spirale sau rețele din wolfram care iese puțin deasupra suprafeței mercurului.

ε) Dispozitivul de aprindere, excitație și punere în funcțiune. Construcția. În fig. 47 este arătată o schemă principală a dispozitivului de amorsare a redresorului; pentru simplificare, anozii principali nu sunt reprezentați. Acest dispozitiv cuprinde:

- Anozii auxiliari 1, care au rolul de a menține un arc în redresor și la sarcini foarte mici, sau în gol, când arcul se stinge pe anozii principali.

- Tija de aprindere (anodul de aprindere) 2 care este menținută deasupra suprafeței mercurului din catod atât timp cât mutatorul funcționează, cum și când acesta nu funcționează.

La punerea în funcțiune a mutatorului, tija este atrasă în jos prin o serie de dispozitive care se vor descrie mai departe și astfel capătul tijei vine în contact cu mercurul. În acel moment, prin bobina 3 circulă un curent. Când curentul în bobina 3 încetează, tija este atrasă în sus de resortul 4 și capătul ei inferior iese din mercur.

- Un transformator de excitație monofazat 18 care are secundarul cu priză mediană, dând o tensiune de 2 · 116 V. Bobinajul 5-6 dă tensiunea în circuitul de aprindere, iar bobinajul 6-7 servește pentru alimentarea anozilor auxiliari de excitație.

- Un releu bipolar 15 compus din două relee de contact 8 și 9. Releul de contact 8, servește pentru circuitul de aprindere și are un resort de rapel slab, iar releul de contact 9 servește pentru întreruperea curentului anodului de aprindere și are un resort de rapel tare.

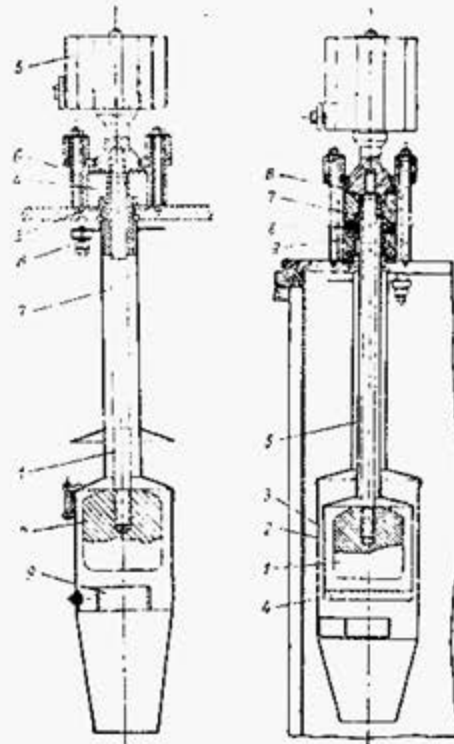


Fig. 45. - Construcție de anod:

1 - tijă de susținere a anodului; 2 - anod de grafit; 3 - garnitură de cauciuc; 4 - izolatorul anodului; 5 - radiator; 6 - șuruburi de fixare, izolate; 7 - tub de protecție a anodului; 8 - izolatoare de porțelan; 9 - piesă de grafit sau de fier pentru înălțarea sarcinii spațiale pozitive.

Fig. 46. - Construcție de anod cu grilă de comandă:

1 - anod de grafit; 2 - tub exterior de protecție a anodului; 3 - tub interior de protecție a anodului; 4 - grilă de comandă; 5 - conductor tubular pentru conexiunea grilei de comandă; 6 - inel de racordare la conductorul grilei de comandă; 7 - izolator superior; 8 - conductorul anodului; 9 - izolator inferior.

Funcționarea. Când transformatorul de excitație nu este sub tensiune, contactele 10 și 11 ale releului bipolar sunt închise, fiind menținute presate de resortele respective. Operația de amorsare a redresorului cuprinde mai multe faze:

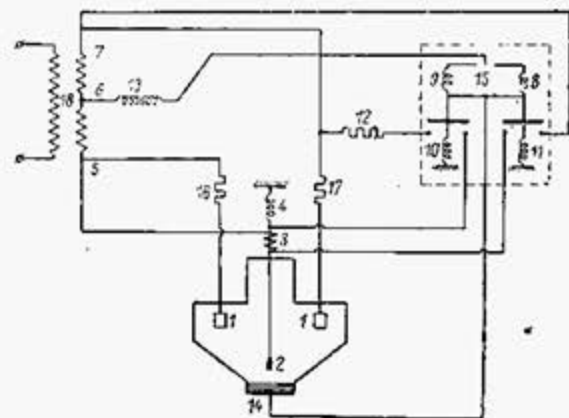


Fig. 47 - Schema principală a dispozitivului de amorsare a redresorului:

Circuitul A de acționare a anodului de aprindere (5-3-11-7). Circuitul B al anodului de aprindere (7-12-10-2-8-9-13-6).

tența 12, contactul 10 al releului bipolar, anodul de aprindere 2, mercurul din baia catodică 14, apoi bobinele în paralel 8 și 9 ale releului de contact și o bobină 13 a circuitului de excitație și în sfârșit punctul 6, neutrul transformatorului de excitație.

Faza III. Curentul trecând prin releul 15 provoacă deschiderea contactului 8, învingând rezistența resortului slab. Contactul 11 se deschide și se întrerupe circuitul A de acționare a anodului de aprindere. Tija de aprindere este atrasă în sus de resortul de rapel 4, capătul ei iese din mercur și se întrerupe circuitul B al anodului de aprindere. Întreruperea se face printr-o scintile la suprafața mercurului. Două cazuri se pot ivi:

Cazul I. Dacă în acest moment sensul curentului este de la anodul de aprindere către mercur, circuitul nu se întrerupe, curentul se continuă printr-un arc care se formează la suprafața mercurului. Apare pata catodică, iar anozii de excitație 1 care sunt alimentați de bornele 5 și 7 ale transformatorului de excitație se aprind. Se stabilește astfel circuitul C (de excitație) în care circulă curentul continuu de la bornele 5 și 7 ale transformatorului de excitație prin rezistențele 16 și 17 ale anozilor de excitație, apoi prin catodul 14, releul bipolar 15 în care curentul trece în paralel, prin cele două bobine ale releului.

Curentul de excitație reglat prin rezistențele 16 și 17 are o valoare obișnuită de 8-9 A și provoacă atragerea armăturii releului 15 de aprindere, ținută în loc de resortul tare și conduce la deschiderea contactului 10, deci întrerupe circuitul B a anodului de aprindere. Din acest moment în tot timpul funcționării redresorului anodul de aprindere rămâne în repaus.

Cazul II. Dacă însă în momentul în care anodul de aprindere părăsește mercurul, sensul curentului este de la mercur la anodul de aprindere, pata catodică apare la capătul anodului de aprindere și un curent poate trece de la anodul de excitație la tija de aprindere, însă pata catodică nu se poate menține

Faza I. Când transformatorul se pune sub tensiune se închide circuitul următor, indicat prin A (circuitul de acționare a anodului de aprindere): borna 5 a transformatorului de excitație, solenoidul 3 al anodului de aprindere, contactul 11 și borna 7 a secundarului transformatorului de excitație. Curentul care trece este de circa 4 A.

Faza II. Armătura anodului de aprindere este atrasă în jos de solenoidul 3 și anodul de aprindere 2 intră în contact cu mercurul. Astfel se stabilește un al doilea circuit, indicat prin B (circuitul anodului de aprindere): borna extremă 7 a transformatorului de excitație, rezis-

pe suprafața metalică a anodului de aprindere și dispare în decursul unei jumătăți de perioadă, atunci când valoarea intensității trece prin zero. În acest caz, deci, redresorul nu se amorsează.

Acum circuitul fiind întrerupt, contactele 11 ale releului se închid la loc, se restabilește circuitul A și operația se repetă ca mai sus, până când în momentul ieșirii tijei din mercur sensul curentului este de la anodul de aprindere către mercur și atunci ne regăsim în situația arătată la cazul I și redresorul se amorsează.

Când se fac lucrările de instalare a redresoarelor, se observă uneori că intensitățile absorbite de excitație au valori diferite de acelea normale arătate mai înainte. O funcționare sigură se produce atunci când curentul absorbit este cel normal. Pentru a ajunge la această situație, se procedează la încercări succesive, racordându-se transformatorul de excitație la faze deosebite sau schimbându-se conexiunile între intrarea și ieșirea transformatorului de excitație.

32. Instalații și dispozitive anexe. a) Pompe de vid. Dispoziția pompelor. Presiunea gazelor din redresor în funcționare normală poate avea valori între 0,0001 și 0,005 mm col. Hg.

Pentru obținerea acestui vid și pentru menținerea lui în cursul funcționării se întrebuințează de toți constructorii două pompe de vid care lucrează în serie.

Una din pompe este în legătură directă cu cuva redresorului și este denumită pompă statică, pompă de vid înaintat sau pompă de difuziune. Această pompă poate lucra numai dacă contrapresiunea la evacuare este mai mică de 20 mm col. Hg. Ea nu poate deci evacua singură gaze în atmosferă. De aceea este nevoie și de o pompă care să refuleze gazele comprimate de pompa statică și să le evacueze în atmosferă. Această pompă este o pompă rotativă volumetrică.

Pompele rotative de construcție bună pot produce un vid până la 0,001 mm col. Hg. Acest vid ar fi suficient pentru funcționarea redresorului, însă la această presiune, debitul pompei este insuficient și nu poate face față creșterii de presiune a gazelor care se degajează în redresor în timpul funcționării sau care intră în redresor din cauza neetanșității.

Pompa statică, deși nu poate lucra sub o diferență mare de presiune, are în schimb avantajul de a putea extrage volume mari de gaze aflate la o presiune foarte joasă.

Pentru a nu pune în funcțiune un timp îndelungat pompa rotativă, unii constructori așază între cele două pompe un rezervor etanș denumit rezervor de vid sau de vacuum.

Dacă în rezervorul intermediar s-a făcut un vid destul de înaintat, pompa rotativă se oprește și se lasă să funcționeze numai pompa statică care refulează în rezervor până când presiunea din el ajunge la valoarea limită până la care funcționarea pompei statice se face în bune condiții.

Între redresor și rezervorul de vid se așază un ventil de întoarcere care permite scoaterea din funcțiune a pompei statice fără ca aerul să intre în redresor.

În mod obișnuit se lasă pompa statică să funcționeze în permanență ceea ce se poate face fără inconvenient, ea nefiind supusă uzurii. Pompa rotativă se pune în funcțiune numai în intervale scurte de timp necesare pentru stabilirea vidului în rezervorul intermediar. Pornirea și oprirea pompei rotative se pot face automat, prevăzându-se la rezervorul intermediar un manometru cu contacte electrice pentru pornirea și oprirea pompei.

În fig. 48 se arată o instalație de vid la un redresor de curent mare.

β) Pompa statică. Este compusă dintr-o baie așezată în partea inferioară a pompei în care se găsește mercur. Acesta este încălzit până la fierbere printr-o rezistență electrică sau un alt dispozitiv de încălzire. La unele redresoare, baia

de mercur are o formă inelară și constituie secundarul pus în scurtcircuit al unui transformator. Din cauza curentului intens de scurtcircuit, mercurul se evaporă. Oricare ar fi sistemul de evaporare al mercurului, vaporii sînt aduși printr-un tub central la o serie de ajutaje, două sau trei, așezate în cascade. Vaporii difuzează cu mare viteză formînd o țîșnitură sub formă de con cu baza în jos, pînă ce se lovesc de pereții reci ai pompei (fig. 49).

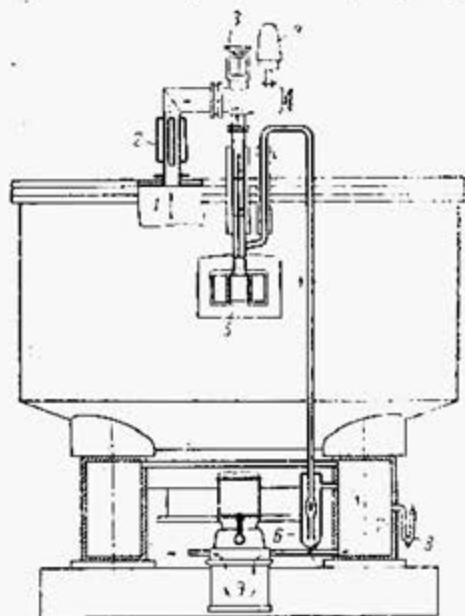


Fig. 48. — Instalație de vid la un redresor de curent mare:

1 — cuva redresorului cu vid înaintat; 2 — țeavă de absorbție cu manta de răcire; 3 — ventil principal; 4 — lampă pentru măsurarea vidului; 5 — pompă de difuzie cu vaporii de mercur, în trei trepte (pompă de vid înaintat); 6 — ventil de întoarcere; 7 — rezervor de vid intermediar; 8 — manometru cu contact; 9 — pompă de vid rotativă.

Aici vaporii de mercur se condensează și picăturile de mercur revin în baia de mercur.

Partea superioară a pompei fiind în comunicație cu redresorul, gazele din redresor vin în contact cu țîșnitura de vaporii de mercur din pompă și sînt antrenate, căpătînd o mare viteză, suficientă pentru a fi aduse în contact cu o a doua țîșnitură de vaporii de mercur de unde sînt împinse către conductă spre pompa rotativă.

Cînd presiunea în redresor a scăzut sub 0,0001–0,00001 mm col. Hg și pompa statică nu mai poate scoate gazele rămase, funcționarea pompei trebuie să continue mai departe spre a împiedica reîntoarcerea gazelor acumulate în rezervorul intermediar.

Se poate întîmpla ca o parte din vaporii de mercur să nu se condenseze în pompă și să treacă în conductă de legătură către rezervorul intermediar sau

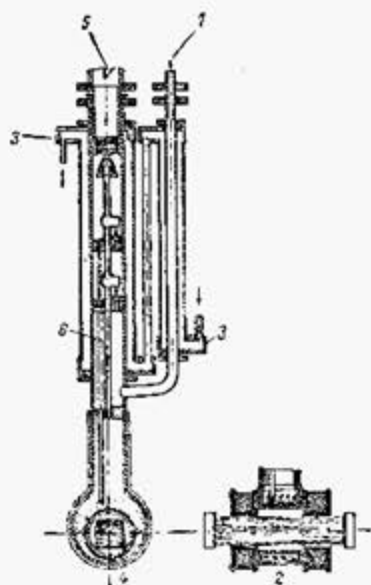


Fig. 49. Pompă de vid înaintat, în trei trepte (pompă statică cu jet de vaporii de mercur):

1 — țeavă de presiune (vid intermediar); 2 — dispozitiv de încălzire; 3 — manta de răcire; 4 — rezervor de mercur; 5 — țeavă de aspirație; 6 — țeavă de colectare a mercurului.

pompa rotativă. Pentru ca să nu se piardă mercurul din pompa statică, conductă dintre această pompă și cea rotativă se construiește cu o înclinație către pompa statică și este răcită intens, astfel ca mercurul să se condenseze și picăturile de mercur, prin gravitație, să se reîntoarcă în pompa statică.

Rezistența de încălzire consumînd 500–1 000 W este alimentată prin transformatoare speciale. Unii constructori utilizează pentru încălzirea rezistenței

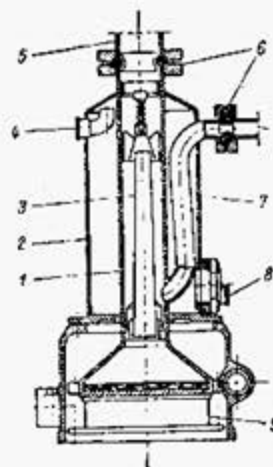


Fig. 50. — Pompă statică:

1 — corpul pompei; 2 — recipientul cu apă de răcire; 3 — tub central; 4 — ieșirea apei; 5 — conductă de aspirație; 6 — flanșe; 7 — conducte de evacuare; 8 — intrarea apei; 9 — placă de încălzire.

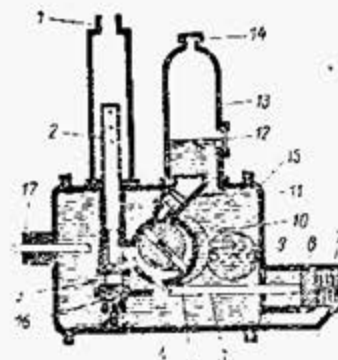


Fig. 51. — Pompă rotativă:

1 — aspirație; 2 — colector de ulei; 3 — robinet de închidere; 4 — arc pentru menținerea robinetului; 5 — paletă; 6 — tijă pistonului de închidere din față; 7 — arc; 8 — piston distribuitor; 9 — pompă cu angrenaje; 10 — rotor; 11 — supapă; 12 — sticlă de nivel; 13 — dom de evacuare; 14 — esaparea în atmosferă; 15 — carcasa; 16 — pinion; 17 — prese.

pompei statice curentul care servește la excitația redresorului, utilizîndu-se astfel o energie care altfel s-ar pierde. În fig. 50 se arată o altă construcție de pompă statică.

γ) *Pompa rotativă* (fig. 51). Corpul pompei este un cilindru orizontal în care se rotește o paletă, cum se arată în figură. La fiecare rotație un anumit volum de gaz din redresor este evacuat. Pompa se găsește înecată în ulei. Un robinet conic închide în timpul nefuncționării conductă de aspirație. Acest robinet se manevrează printr-un dispozitiv de cremalieră. În stare de nefuncționare arcul 7 împinge spre stînga pistonul 6 și robinetul se află în poziția «închis». O dată cu punerea în funcțiune intră în funcțiune și o pompă 9 cu roți dințate care se găsește cufundată în ulei. Această pompă refulează uleiul în camera 15, împinge pistonul către dreapta pînă cînd presiunea exercitată pe suprafața pistonului echilibrează presiunea resortului 8 care acționează în sens contrar. Se stabilește o poziție de echilibru a pistonului la care robinetul 3 se află în poziție «deschis».

Îndată ce se oprește pompa, presiunea uleiului asupra pistonului dispare și sub acțiunea resortului 7 robinetul se închide.

8) *Dispozitivul de măsurare a vidului*. La mutatoarele moderne se întrebunțează un indicator electric al presiunii din interior.

Funcționarea aparatului se bazează pe principiul variației conductibilității termice a gazelor în funcție de presiune. Între două corpuri aflate la temperaturi diferite, așezate față în față, se stabilește un transport de căldură prin radiație și convecție. Radieria este independentă de presiunea gazului aflat între cele două corpuri, pe când convecția este funcție de această presiune și de aceea poate fi folosită pentru a măsura presiuni reduse. În vid absolut convecția este nulă; ea crește cu presiunea gazului.

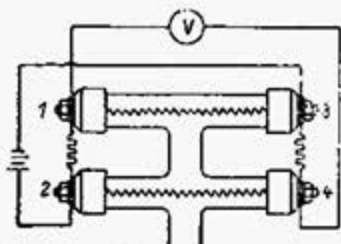


Fig. 52. — Schema unui indicator de vid termic.

Principiul aparatului este arătat în fig. 52. Firele de platină 1-3 și 2-4 sunt întinse în vid pe când firele 1-2 și 3-4 în aer. Aceste fire constituie o punte Wheatstone alimentată de o sursă de curent sensibil constant. Firele 1-3 și 2-4 se încălzesc cu atât mai mult cu cât presiunea este mai scăzută. Prin încălzire, tensiunea între bornele opuse ale punții crește și această tensiune dă o măsură a presiunii gazelor. Datorită conexiunii rezistențelor în punte,

variațiile temperaturii exterioare sunt compensate. Galvanometrul dispozitivului poate fi prevăzut cu trei contacte prin care se comandă funcționarea automată a pompelor.

33. Mijloacele pentru etanșarea cuvelor metalice. *a) Necesitatea etanșării.* Menținerea vidului în redresor este o condiție esențială a funcționării fără accidente. Aerul care intră în cuva redresorului neetanș, se transformă, sub influența arcului electric, într-o serie de produși care se combină cu mercurul și cu fierul și provoacă murdărirea redresorului. Pe suprafața mercurului apare un reziduu de culoare cenușie, glazura izolatoarelor se alterează, pe tecile anozilor apar incrustații. Toate acestea duc cu timpul la scoaterea din funcțiune a redresorului. La redresoarele cu recipiente de sticlă este ușor să se asigure etanșeitatea, deoarece conductoarele de curent pot fi sudate de sticlă. În acest caz, electrozii, nu sînt demontabili. La redresoarele cu cuvă metalică, la care este necesar să se demonteze anozii, este nevoie să se utilizeze garnituri amovibile.

Problema găsirii unor garnituri bune a făcut obiectul a numeroase cercetări. Este de observat că pentru orice electrod care pătrunde în redresor trebuie două garnituri, una între conductorul de curent și izolatoare și alta între izolatoare și cuva redresorului.

Se vor descrie diferitele feluri de garnituri realizate de constructori.

β) Garnitura de mercur. În fig. 53 se arată dispozitivul de intrare a electrozilor prin placă. Izolatorul de trecere apasă pe o rondelă de azbest menținută pe loc prin presiunea exercitată în acest mod. Spațiul dintre izolator și placă este umplut cu mercur, iar la partea superioară este închis de o rondelă de cauciuc comprimată de o flanșă. Deosebit este prevăzut un indicator de nivel al mercurului.

Aerul nu poate intra în cuvă deoarece ar trebui să treacă prin stratul de cauciuc. Garnitura de azbest se poate înlocui prin alta de cauciuc, dacă temperatura nu este mare. Mercurul nu atacă nici cauciucul și nici azbestul; el nu se evaporă dacă temperatura este joasă, ceea ce se petrece în cazul unei bune răcirii a anozilor.

Garnitura cu mercur prezintă avantajul de a putea menține un vid înalt și de a se putea controla lesne etanșeitatea prin inspectarea nivelului. Dacă acesta scade, înseamnă că mercurul se scurge în cuvă și deci este o neetanșeitate. Căderea picăturilor de mercur în cuvă nu produce nici o perturbare în func-

ționarea mulatorului. Dezavantajele acestei garnituri sînt: azbestul posedînd ca liant o substanță organică, la încălzire se produc gaze.

În caz de variații bruște ale sarcinii, mercurul poate fi aruncat afară și poate să dea naștere la scurtcircuit. Dacă garniturile lucrează calde, se pot degaja vapori de mercur în spațiul înconjurător, ceea ce prezintă un pericol pentru personalul de serviciu.

γ) Garnitura cu cauciuc. Etanșarea în acest mod este foarte simplă, dar mai puțin eficientă decît în cazul de mai înainte.

Garniturile sînt formate din inele plate de cauciuc care au o suprafață de contact foarte mare, de vreo cinci ori mai mare decît aceea necesară pentru o bună etanșare. În felul acesta se micșorează presiunea specifică pe suprafața izolatorului.

O deosebită importanță o are calitatea materialului din care se face garnitura. Sînt sorturi de cauciuc care degajă o mare cantitate de gaze și care se întăresc lesne sub acțiunea combinată a temperaturii și a vidului.

S-a căutat să se remedieze degajarea gazelor, micșorîndu-se cît se poate suprafețele garniturii în contact cu vidul. O perfecțiune a acestor garnituri o reprezintă protejarea suprafeței care este în vid cu un inel de oțel cu secțiunea în formă de V care nu este atacat de mercur și care separă suprafețele de cauciuc de spațiul în care se află vidul.

Garnitura de plumb este superioară celei de cauciuc. Ea se presează la montare pînă cînd plumbul trece de limita sa de curgere, ceea ce face să ia calitățile unui lichid întocmai ca și mercurul și de aceea etanșează perfect. Garnitura de plumb nu se poate întrebuița în cazul diametrelor mari ca la capul mulatorului sau la catod, pentru că nu se poate strînge suficient, adică pînă cînd plumbul să ajungă la limita de curgere.

Garnitura este protejată printr-un inel de aluminiu pentru ca vaporii de mercur să nu atace plumbul.

Asemenea garnituri nu pot fi deteriorate în cazul unui scurtcircuit, pentru că eforturile care se nasc în acest caz sînt mai mici decît eforturile care sînt necesare pentru strîngerea garniturii.

34. Răcirea redresoarelor cu arc de mercur. Din cauza căderii de tensiune în redresoare, care se manifestă la catod, anozii și în arc, se produce o cantitate de căldură apreciabilă care trebuie îndepărtată. Temperatura maximă admisibilă pe placa anozilor este de 60°C. Suprafața cuvei redresoarelor fiind prea mică, această căldură nu poate fi evacuată prin radiație. Este nevoie de dispozitive speciale pentru a asigura răcirea redresoarelor. Pompa de vid înaintat trebuie să fie și ea bine răcită pentru ca puterea sa volumetrică să fie complet utilizată.

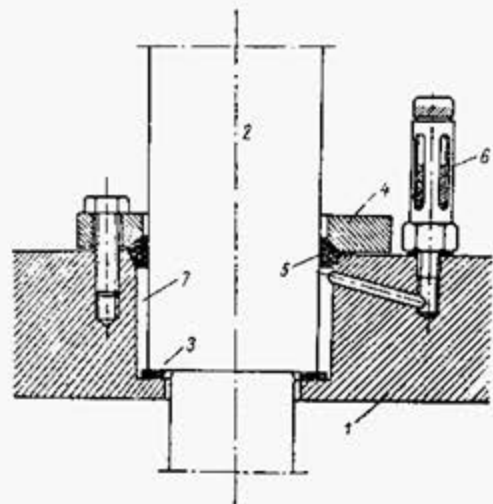


Fig. 53. — Garnitură de mercur:

1 — placă de anod; 2 — izolator de trecere; 3 — garnitură de azbest; 4 — flanșă; 5 — inel de cauciuc; 6 — indicator de nivel al mercurului; 7 — mercur.

Există două feluri principale de răcire a redresoarelor: prin circulație de apă și prin ventilație forțată.

α) Răcirea prin circulație de apă. Redresoarele mari cu cuvă metalică se răcesc numai prin circulație cu apă. Din cauza garniturilor, temperatura cuvei trebuie să fie menținută la cel mult 50–60°C.

Cuva metalică este înconjurată cu o altă cuvă formând cu prima un spațiu închis în care circulă apa de răcire. Catodul este răcit printr-o manta separată de apă, pentru că potențialul lui este diferit de potențialul cuvei.

Anozii au un dispozitiv special de răcire care nu este în legătură cu dispozitivul de răcire al cuvei. La unele tipuri constructive, anozii metalici sînt goi și răciți cu apă.

Redresoarele cu anozii de grafit au nevoie de radiatoare exterioare mult mai mici, deoarece răcirea se face prin radieră directă a căldurii care este absorbită prin sistemul de răcire al cuvei.

Apa rece intră mai întâi în dispozitivul de răcire al catodului, trece printr-un tub izolant de cauciuc în dispozitivul de răcire al cuvei și apoi în placa anozilor.

Unele tipuri de mutatoare au un sistem de țevi de răcire în interiorul cuvei (fig. 54).

În afara redresorului propriu-zis trebuie să se asigure o răcire foarte bună și a pompei de vid înaintat.

Debitul de apă necesar la 15°C este de 1 l/min pentru o intensitate a curentului continuu debitat de 100 A. Debitul de apă de răcire crește proporțional cu debitul de curent. Pompa statică necesită un debit de 1,2 l/min.

Mal exact, debitul de apă de răcire necesar se poate calcula cu formula:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 0,24 \cdot x}{1000 (t_2 - t_1)},$$

în care:

Q este debitul de apă, în l/min, cuprinzînd și apa de răcire necesară pompei statice;

U — căderea totală de tensiune la catod, arc și anozii, în volți (20–25 V);

t_2 și t_1 — temperatura de ieșire și de intrare a apei;

x — un coeficient stabilit de practică a cărui valoare este de 1,1.

Există următoarele dispozitive de răcire:

Răcire directă prin apă curentă în circuit deschis (fig. 55). Acest dispozitiv se utilizează dacă există apă de răcire din abundență, dacă apa este ieftină și dacă nu are săruri dizolvate în prea mare cantitate. Racordul de intrare al apei se face printr-un tub de cauciuc cu lungimea de

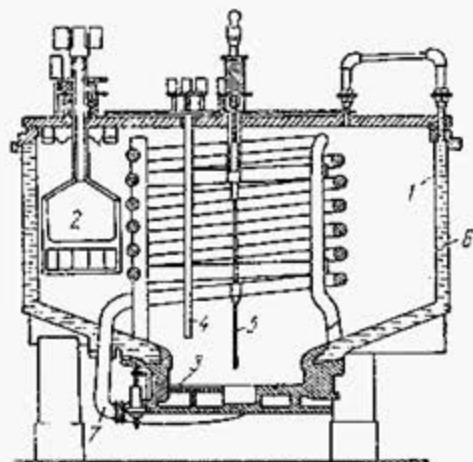


Fig. 54. — Redresor polianodic cu baie de mercur, tip RN-30 (Electrosila):

1 — cuvă cu vid înaintat; 2 — anod principal; 3 — catod de mercur; 4 — anod auxiliar de excitație; 5 — anod de aprindere; 6 și 7 — răcire cu apă.

cîtiva metri astfel ca rezistența coloanei de apă să fie destul de mare și să se împiedice deteriorarea cuvei prin electroliză. Ieșirea apei se poate face printr-o țîș-nitură de apă într-o pîlnie.

Un sistem automat (fig. 56) protejează instalația, determinînd declanșarea redresorului în cazul opririi apei de răcire.

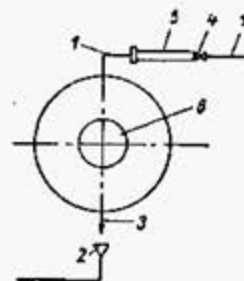


Fig. 55. — Schema dispozitivului de răcire directă prin apă curată în circuit deschis:

1 — intrarea apei de răcire; 2 — evacuarea apei de răcire; 3 — ieșirea din redresor; 4 — vană de închidere; 5 — racord de cauciuc; 6 — mutator.

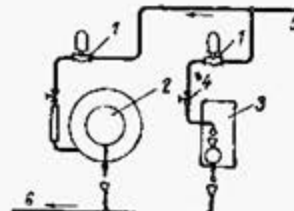


Fig. 56. — Schema unei instalații de răcire directă cu supape automate:

1 — supape automate; 2 — mutatoare; 3 — grup de pompe de vid; 4 — robinet comandat manual pentru reglarea debitului de apă; 5 — intrarea apei de răcire; 6 — ieșirea apei de răcire.

Răcire indirectă prin apă curentă în circuit închis (fig. 57). Pentru a evita depunerile de piatră sau de nămol în canalele de răcire a redresorului, apa de răcire are un circuit închis, fiind împinsă de o pompă. După ce a trecut prin redresoare, apoi prin pompă, apa trece printr-un răcitor cu țevi și se întoarce în mutator, după cum se arată în figură.

Răcitorul este răcit cu apă curentă și depunerile de calcar sau nămol nu se mai fac în mutator, ci în răcitor, de unde pot fi îndepărtate mai ușor.

β) Răcirea prin circulație de aer. Răcire indirectă prin circulație de aer (fig. 58). Dispozitivul este la fel cu cel precedent cu deosebirea că răcirea apei de circulație se face printr-un curent de aer care trece printr-un răcitor, curentul fiind produs de un ventilator. Această dispoziție se folosește pentru instalațiile de înaltă tensiune. În plus are și avantajul că funcționarea nu este întreruptă în cazul opririi apei de răcire. Conductele de apă se montează izolat. Răcitorul este legat de ventilator printr-un canal format dintr-un material izolant.

Răcire directă prin circulație de aer. În ultimul timp s-a introdus răcirea directă a cuvei redresorului printr-un curent de aer. Un ventilator așezat în imediata apropiere a mutatorului sau chiar sub redresor trimite aerul de răcire direct asupra mutatorului. Pompa statică neputînd fi răcită suficient prin aerul suflat direct, se utilizează un răcitor cu apă în circuit închis, care este răcit la rîndul său de curentul de aer al ventilatorului redresorului.

35. Redresoare fără pompe de vid. Cercetări și studii făcute în ultimii ani au permis realizarea redresoarelor cu cuvă metalică, fără pompe de vid și fără aparate de măsurat vidul (redresoare cu arc de mercur vidate sau sigilate). Pentru a se realiza aceste redresoare, au trebuit unele soluționări constructive.

α) Construcția unor cure complet etanșe. Dificultatea principală este executarea de suduri fără pori. A trebuit să se găsească mai întâi un procedeu de descoperire a locului unde sunt pori. Pentru aceasta se introduce în cuvă amoniac sub presiune mare și se acoperă în exterior cu o substanță indicatoare (azotat de mercur) care în prezența amoniacului își schimbă culoarea din alb în negru. Schimbarea de culoare este foarte vizibilă observându-se mici pete

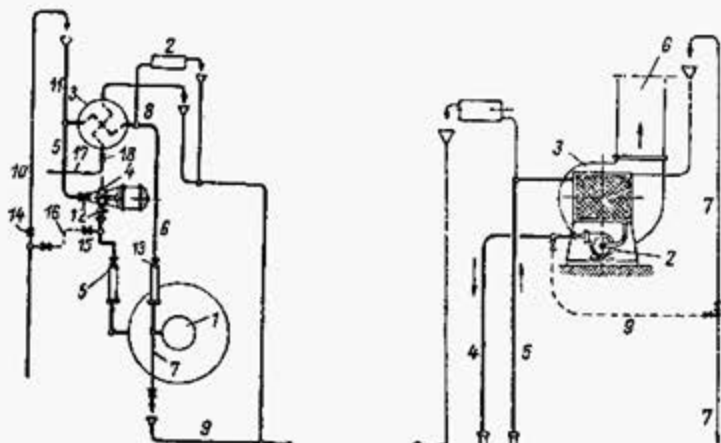


Fig. 57. — Schema unei instalații de răcire indirectă:

1 — redresor; 2 — rezervor de preaplin; 3 — răcitor; 4 — pompă de circulație; 5 — conductă de aducere a apei de răcire la mutator; 6 — conductă de plecare a apei de la mutator; 7 — conductă de evacuare; 8 — conductă de legătură cu rezervorul de preaplin; 9 — conductă de evacuare; 10 — sositrea apei curente; 11 — conductă de umplere; 12 — vană de oprire a pompei; 13 — vană de oprire a redresorului; 14 — vană de sositrea apei curente; 15 — vană pentru răcire directă; 16 — racord de cauciuc pentru răcire directă; 17 — conductă de aducere a apei curente în răcitor; 18 — vană de oprire a răcitorului.

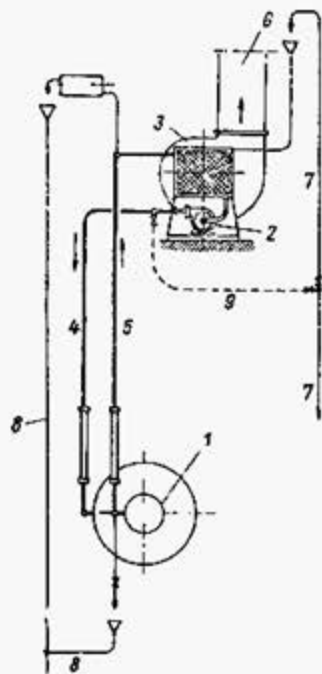


Fig. 58. — Schema unei instalații de răcire indirectă prin circulație de aer:

1 — redresor; 2 — pompă de circulație; 3 — dispozitivul de răcire; 4 — conductă de aducere a apei în redresor; 5 — conductă de plecare a apei de la redresor; 6 — evacuarea aerului; 7 — sositrea apei curente; 8 — conductă de evacuare a apei; 9 — racord pentru răcire directă.

negre în locul unde sunt porii; ele apar chiar în prezența unei cantități foarte mici de amoniac. Sensibilitatea procedurii poate fi mărită prelungind durata cercetării.

O dată descoperite locurile unde sînt neetanșeități se efectuează reparația necesară prin sudare.

β) Suprimarea garniturilor de cauciuc, plumb, azbest sau mercur. Garniturile se pot slăbi în timpul funcționării mutatorului, șuruburile de stringere putîndu-se desface.

În locul acestor garnituri se întrebuințează sudarea între materia ceramică, formînd izolatorul de traversare și cuva metalică. Pentru că sudarea directă între porțelan și fier nu reușește, se întrebuințează un intermediar: sticla.

De mult timp se cunoaște posibilitatea sudării între oțel și sticlă. Dificultatea constă mai ales în obținerea unui oțel avînd același coeficient de dilatare ca și sticla, ceea ce s-a realizat printr-un aliaj cu crom, nichel și cobalt.

Sudarea între sticlă și porțelan se realizează mai ușor, componența chimică a acestor materiale fiind identică.

γ) Menținerea vidului la redresoarele fără pompe. Redresoarele fără pompe nu trebuie să degajeze gaze în timpul funcționării decît în cantități foarte mici. De aceea operația de formare se face în fabrică, în condiții speciale.

Cuva metalică se introduce într-un cuptor încălzit la cîteva sute de grade. În acest timp se face vidul cu ajutorul pompelor. Apoi se încălzesc anozii, făcînd să se treacă un curent, de formare, foarte intens.

Anozii, care sînt de grafit, ating temperaturi, în timpul formării, de 1000°C. În acest mod toate părțile redresoarelor sînt încălzite la temperaturi de cîteva sute de grade mai mari decît acelea pe care trebuie să le suporte în timpul serviciului. La redresoarele de construcție obișnuită nu se poate face o formare în acest mod, deoarece temperaturile înalte nu pot fi suportate de garnituri. Gazele care eventual au mai rămas în redresor sau care s-ar introduce din cauza unei mici neetanșeități, pot avea influențe diferite după natură. S-au făcut experiențe introducîndu-se intențional anumite gaze și s-au constatat următoarele:

Oxigenul introdus într-un redresor care a fost format la temperaturi înalte este sau absorbit de pereți sau formează un oxid de fier și nu se mai degajează. Același lucru se întîmplă și cu vaporii de apă. Dacă arcul acționează asupra vaporilor de apă, aceștia sînt disociați în elementele componente O și H. Oxigenul este absorbit, iar hidrogenul rezultat este îndepărtat din cuvă după cum se arată mai departe.

Azotul, oxidul de carbon și bioxidul de carbon sub influența arcului electric, dispar și nu se mai refac.

Se presupune că azotul formează cu fierul un compus care este stabil pentru temperaturi sub 800°C. Oxidul și bioxidul de carbon se desfac în cărbune care se depune sub formă de pulbere și oxigen care se combină cu fierul sau este absorbit după cum s-a arătat anterior.

Mercurul din redresor de asemenea poate absorbi mari cantități de gaze. În caz de suprasarcini mari cînd se face o degajare intensă a gazelor el contribuie la absorbția lor. Gazele degajate sînt încă absorbite și de părțile din cuvă care sînt la o temperatură mai scăzută.

Hidrogenul are proprietăți diferite de a celorlalte gaze. Analiza chimică făcută la gazele extrase din mutatoare, răcite cu apă, arată că gazele extrase se compun din ea mai mare parte din hidrogen.

Cauza dispariției celorlalte gaze provenite din atmosferă este lămurită, după cum s-a arătat; prezența hidrogenului are însă o altă explicație.

În apa de răcire se găsesc molecule de apă disociate în ioni negativi (OH) și ioni pozitivi (H).

Ionii de hidrogen constituiți numai dintr-un nucleu fără electron au un diametru mai mic în comparație cu diametrul unui atom.

Dacă se consideră constituția intimă a corpurilor, cuva metalică se prezintă ca o plasă cu ochiuri în care pot intra cu ușurință ionii de hidrogen, nu însă și atomii care au un volum mai mare.

Hidrogenul care a pătruns în cuvă sub formă de ioni își capătă electronii care lipsesc în timpul funcționării mutatorului, restabilindu-se astfel compoziția

moleculară. Din această cauză ei nu mai pot traversa din nou pereții cuvei și se acumulează fiind extrași de pompele de vid.

La redresoarele a căror cuvă nu este înconjurată cu un strat de apă de răcire, hidrogenul care există în interiorul cuvei este ionizat de arc electric și se observă fenomenul invers al trecerii hidrogenului dinăuntru cuvei în afară.

La redresoarele răcite cu apă, cele două fenomene arătate se produc simultan: pătrunderea hidrogenului din apa de răcire în cuvă și trecerea către exterior a hidrogenului ionizat din cuvă. Predomină un fenomen sau altul după condițiile de funcționare a mutatorului, temperatură și sarcină.

Pentru a asigura funcționarea mutatorului fără pompe, trebuie ca răcirea să nu se facă prin apă, iar cuva mutatorului trebuie să fie neapărat metalică pentru că fenomenele arătate nu se produc la redresoarele cu recipient de sticlă. Sticla nu este permeabilă pentru ioni de hidrogen și nici nu poate absorbi gazele.

Redresoarele cu cuvă de oțel, dacă au fost degazeificate complet și dacă etanșeitatea absolută este asigurată, își mențin vidul fără ajutorul pompelor de vid un timp nelimitat.

36. Dispozitive de comandă a grilelor. α) Comanda prin tensiuni sinusoidale. În fig. 59 este arătat un dispozitiv de comandă prin tensiuni sinusoidale.

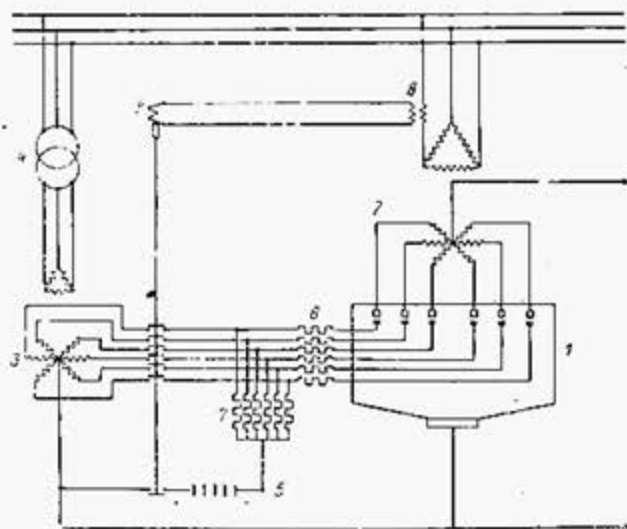


Fig. 59. — Comanda grilelor prin tensiune sinusoidală:

1 — redresor; 2 — transformatorul redresorului; 3 — transformator de comandă; 4 — regulator de inducție; 5 — baterie de acumulatori; 6 — rezistențe de grilă; 7 — rezistențe; 8 — transformator de intensitate; 9 — relee de grilă.

Deoarece tensiunea grilei este necesar să varieze numai o dată în timpul unei perioade, se poate utiliza pentru comandă o tensiune sinusoidală de frecvență rețelei de alimentare, care trebuie să depășească însă un anumit timp valoarea tensiunii critice. Grilele primesc tensiunile de la un transformator cu secundarul hexafazat în conexiune diametrală.

Tensiunea de comandă poate fi defazată prin ajutorul unui regulator de inducție și astfel se modifică momentul aprinderii anozilor.

Acest moment este determinat de intersecția sinusoidei tensiunii de comandă U_g cu dreapta reprezentând tensiunea de aprindere U_z (fig. 60).

Pentru că intersecția sinusoidei cu dreapta paralelă la axa absciselor nu este precisă, nici momentul aprinderii nu este determinat exact.

ΔU_z arată intervalul de tensiuni în care aprinderea se poate face și $\Delta \phi$ variația corespunzătoare a unghiului de întârziere la aprindere.

Se poate ameliora această cauză de eroare prin mărirea tensiunii de grilă. Mai avantajos este a se face comanda prin tensiune în impulsuri.

În cazul unei suprasarcini sau al unei aprinderi inverse, relee de grilă θ (fig. 59) întrerupe circuitele de alimentare a grilelor cu tensiune sinusoidală și pune în circuit o baterie de acumulatori 5 care polarizează negativ toate grilele și drept consecință scoate din funcțiune redresorul 1.

β) Dispozitivele de comandă electromecanice. În scopul de a se obține o comandă precisă nu se întrebuințează ca tensiune de comandă a grilelor tensiuni de formă sinusoidală, ci de formă rectangulară.

Grilele sînt legate prin intermediul unor rezistențe R_2 și R_1 (fig. 61) cu polul negativ al unei baterii de acumulatori 1 al cărui pol pozitiv este conectat cu

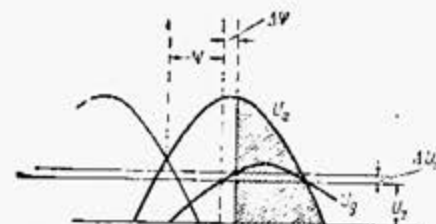


Fig. 60. — Diagrama comenzii prin tensiune sinusoidală:

U_g — tensiunea anozilor; U_z — tensiunea de comandă a grilei; U_z — tensiunea critică; ΔU_z — variația tensiunii critice; ϕ — întârzierea la aprindere; $\Delta \phi$ — variația întârzierii la aprindere.

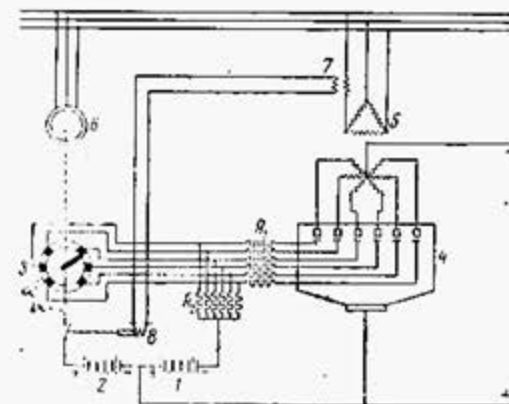


Fig. 61. — Dispozitiv electromecanic de comandă pentru aplicarea unor tensiuni continue la grilele de comandă:

1 și 2 — baterii de acumulatori dînd tensiuni pozitive și negative pentru alimentarea grilelor; 3 — disc de distribuție; 4 — mutator; 5 — transformator; 6 — motor sincron; 7 — transformator de intensitate; 8 — relee de grilă (de variație a unghiului de aprindere)

din urmă este conectată la un distribuitor, care este format din o serie de contacte fixe legate cu grilele prin rezistențele R_1 . O perie mobilă este antrenată de un motor sincron alimentat de aceeași sursă de curent ca și mutatorul. În cursul rotirii ei, peria stabilește succesiv contactul cu polul pozitiv al bateriei de acumulatori. Bateriile 1 și 2 sînt puse în acest moment în circuit închis, curentul fiind însă limitat de rezistența R_2 care se alege foarte mare. Grila anodului primește de la bateria 2 impulsuri pozitive în timpul cît peria este în atingere cu contactul distribuitorului și imediat după întreruperea contactului primește tensiune negativă prin bateria 1.

Pentru a modifica momentul cînd grilele trebuie să primească impulsuri se poate roti șaiba pe care sînt fixate contactele schimbătorului.

Un alt dispozitiv care permite un reglaj precis al momentului aprinderii produce deplasarea axei magnetice a motorului sincron care antrenează

distribuitoare din schema precedentă. Motorul sincron este de o construcție specială fiind alimentat în curent alternativ în rotor prin trei inele cu perii de contact

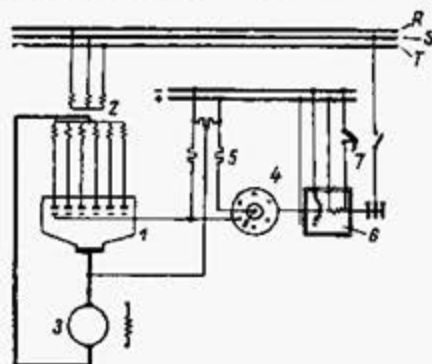


Fig. 62. — Dispozitiv mecanic de comandă pentru aplicarea tensiunii continue la grilele comandate:

1 — mutator; 2 — transformator; 3 — sarcina mutatorului; 4 — distribuitor; 5 — rezistență de grilă; 6 — motor sincron cu bobine inductoare în stator; 7 — reostat pentru înțirizarea aprinderii.

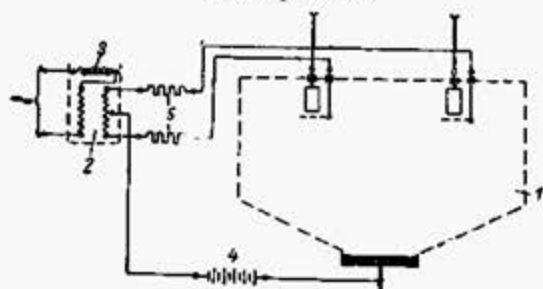


Fig. 63. — Dispozitiv static de comandă a grilelor: 1 — mutator; 2 — transformator; 3 — bobină de reacță; 4 — baterie de acumulare; 5 — rezistențe de grilă.

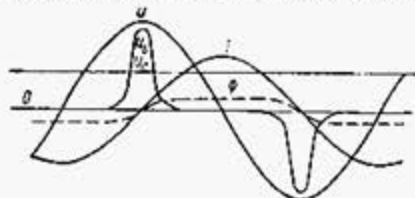


Fig. 64. — Diagrama curentului, fluxului și tensiunii: u — tensiunea de alimentare; i — curentul în primarul transformatorului; Φ — fluxul în transformator; u_c — potențialul catodului; u_s — tensiunea în secundarul transformatorului de impulsuri.

lator de inducție. Un alt dispozitiv static care cel arătat în fig. 65.

(fig. 62). Bobinele inductoare sînt așezate în stator conform conexiunii arătate. Fluxurile produse de aceste bobine sînt decalate cu 90° . Dacă se produce variația unuia dintre fluxuri prin manevrarea unui reostat 7 se variază poziția rezultantei celor două fluxuri adică a axei magnetice a motorului sincron. Aceasta aduce variația momentului de aprindere.

γ) Dispozitive de comandă statice. Este posibil să se producă variația bruscă a tensiunii de comandă a grilelor și printr-un dispozitiv care nu necesită contacte mobile. El este compus în principiu dintr-un transformator 2 cu un miez funcționând la saturație (fig. 63).

Bobinajul primar al transformatorului este conectat în serie cu bobina de reacță 3, în scopul de a se menține forma sinusoidală a curentului.

Punctul neutru al bobinajului este legat cu catodul printr-o baterie de acumulare care dă tensiunea de negativare.

Curentul primar este mult superior curentului magnetizant astfel că fluxul nu variază decât în momentul cînd curentul trece prin 0 (fig. 64). Se produce în secundar impulsuri de tensiune în momentul variației fluxului, variații care se suprapun peste tensiunea de negativare dată de baterie.

Momentul de apariție al impulsurilor se poate varia alimentînd transformatorul 2 prin intermediul unui regulator de inducție. Un alt dispozitiv static care

În circuitul secundar al unui transformator 7 care produce tensiunea de comandă se află o rezistență 3, o inductanță 2 și un redresor mic uscat 4.

Grila primește tensiunea de comandă de la borna inductanței 2.

În fig. 66 se arată tensiunea u produsă la bornele secundare ale transformatorului, cum și variația curentului i în secundar, iar în fig. 67, tensiunea care se aplică grilei.

Din cauză că elementul redresor din circuitul secundar al transformatorului permite trecerea curentului numai într-un singur sens, alternanțele pozitive sînt suprimate și deci curentul este întrerupt periodic.

Durata alternanței negative este însă prelungită din cauza inductanței 2 (fig. 65).

În momentul cînd curentul din circuitul secundar al transformatorului se întrerupe, grila primește brusc tensiunea normală și astfel se produce o ridicare bruscă a tensiunii stabilindu-se o undă cu front vertical.

Prin intermediul unei baterii de acumulare se poate da tensiunea de negativare necesară grilei.

Pentru a modifica momentul aprinderii anozilor este suficient a modifica raportul între rezistența 3 și inductanța 2 prin variația rezistenței cu ajutorul unui reostat.

δ) Comanda statică prin redresor auxiliar. În locul distribuitorului cu perie mobilă se utilizează arcul învîrtitor dintr-un redresor auxiliar (fig. 68).

Redresorul auxiliar 3 capătă o sarcină permanentă prin o rezistență 12. Curentul care trece prin fiecare anod are o formă rectangulară și produce în secundarul transformatoarelor de intensitate 8 (încărcate cu rezistențele 9) curenți și tensiuni de aceeași formă. Aceste tensiuni rectangulare se aplică prin rezistențele 9 redresorului principal 1.

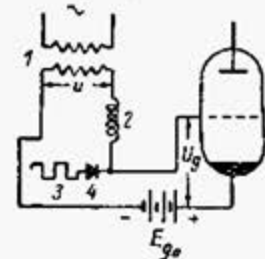


Fig. 65. — Dispozitiv static de comandă a grilelor:

1 — transformator de impulsuri de comandă a grilelor; 2 — bobină de reacță; 3 — rezistență de reglaj; 4 — redresor uscat; U_g — tensiunea grilei.

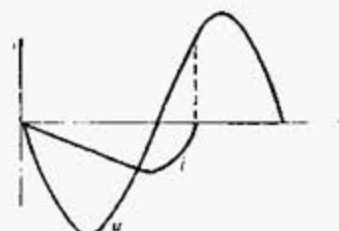


Fig. 66. — Tensiunea și curentul în secundarul transformatorului.

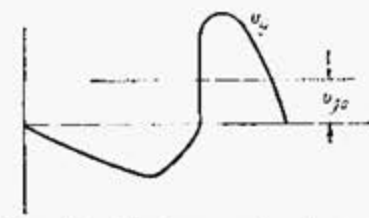


Fig. 67. — Tensiunea aplicată grilei.

O baterie de acumulare 18 dă tensiunea de negativare necesară. Decalajul impulsurilor se poate produce printr-un regulator de inducție (nearătat în figură) montat pe circuitul de alimentare a transformatorului 4 al redresorului auxiliar de comandă. Decalajul impulsurilor se poate obține și pe altă cale. Dacă redresorul auxiliar de comandă are la rîndul său grile de comandă care primesc tensiuni sinusoidale de la un alt transformator 5 și o tensiune continuă de negativare de la o baterie de acumulare 16, se poate obține prin simpla variație a tensiunii de negativare, modificarea momentului de aprindere a anozilor redresorului auxiliar 3 și drept consecință a redresorului principal 1.

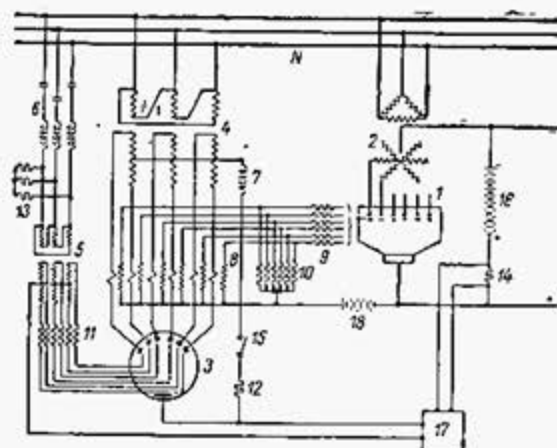


Fig. 68. - Comanda prin redresor auxiliar:

1 - redresorul principal; 2 - transformatorul principal; 3 - redresorul auxiliar de comandă; 4 - transformatorul redresorului auxiliar; 5 - transformatorul de comandă; 6 - filtru; 7 - bobină de egalizare; 8 - transformator de intensitate; 9, 10, 11 - rezistențe de grilă; 12 - rezistență de sarcină a mutatorului auxiliar; 13 - rezistențe de sarcină a filtrului; 14 - rezistență; 15 - disjunctorul rețelei de grilă; 16 - baterie de acumulare; 17 - amplificator; 18 - baterie de acumulare.

b) Redresoare monoanodice cu arc de mercur

37. **Descriere generală.** Prin ansambluri de redresoare monoanodice se pot constitui grupuri hexafazate sau dodecafazate. Avantajele acestei asamblări sînt următoarele:

Din punct de vedere constructiv este mai ușor de fabricat redresoare monoanodice pentru că recipientele sînt mult mai mici. Numărul tipurilor de redresoare se reduce deoarece este posibil a se cupla în paralel mai multe redresoare identice și a se obține astfel ansambluri de putere mai mare.

Prețul de cost este mai redus pentru că numărul de elemente similare face posibilă o construcție în serie.

Rezerva este constituită dintr-un element mai ieftin.

Drumul arcului între anod și catod fiind mai scurt, căderea de tensiune în arc este mai mică, de unde rezultă un randament mai bun.

În caz de avarie, înlocuirea unui element monoanodic este ușoară și se face repede.

Redresoarele cu un singur anod au o cavă de formă cilindrică. Ele pot fi răcite cu aer sau cu apă în care caz cava are un înveliș tot metalic formînd o cămașă de apă. În capacul cuvei sînt introduși electrozii. În centru se găsește anodul principal, iar de o parte și de alta se găsește traversările pentru grilele de comandă și la unele tipuri traversările pentru doi anodi de excitație și anodul de aprindere.

38. **Ignitronul.** Există tipuri de redresoare monoanodice la care aprinderea se face printr-un alt sistem decît cel arătat la redresoarele cu mai mulți anodi. Astfel, există sistemul la care aprinderea se repetă la fiecare perioadă în loc de a avea o excitație continuă.

Se folosește un electrod de aprindere constituit dintr-un semiconductor, de exemplu carbon, al cărui vîrf este introdus cîțiva milimetri într-o baie de mercur (fig. 69).

După cum se vede în figură, vîrfurile electrodului de aprindere nu este nădat de mercur; astfel rămîne un strat de gaz între mercur și electrod. Dacă se aplică o

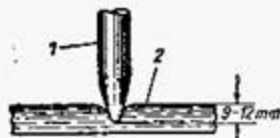


Fig. 69. - Principiul amorsării ignitronului:

1 - electrodul de aprindere; 2 - catodul.

tensiune de 50-200 V, stratul este străpuns, trece un curent de 10-30 A și scînteia inițială se transformă repede într-o pată catodică la suprafața mercurului. Dacă anodul se află în acest timp la un potențial pozitiv față de catod, în cîteva microsecunde se ionizează spațiul anod-catod și apare arcul principal pe anod. Desfășurarea exactă a acestui proces de «aprire» a tubului nu se cunoaște încă în mod satisfăcător.

Tuburile de acest fel se numesc *ignitroane*, din cauza procedurii de aprindere (ignitie) utilizat.

Electrodul de aprindere permite declanșarea arcului la fiecare perioadă a tensiunii anodice, deci în cazul unei frecvențe de 50 Hz la un interval de 200 milisecunde. O astfel de caracteristică nu este realizabilă cu un dispozitiv mecanic. Electrocul de aprindere permite, în plus, eliminarea anozilor auxiliari sau de excitație.

Dacă se reglează momentul în care electrodul de aprindere primește tensiunea de amorsare, se poate întârzia aprinderea ignitronului și deci se poate varia curentul prin ignitron într-un mod similar cu cel arătat la tiratron. Ignitronul combină avantajul unei capacități de curent foarte mari a redresorului cu arc de mercur cu proprietatea de reglaj caracteristică tiratronului.

Deși ignitronul este similar cu tiratronul în ce privește performanța, este fundamental deosebit în ce privește principiul de funcționare. În tiratron, grila se opune la aprinderea tubului, pe cînd la ignitron, electrodul de aprindere provoacă aprinderea tubului.

Un dezavantaj al ignitronului îl constituie impedanța mică a circuitului electrodului de aprindere și curentul relativ mare necesar pentru aprindere.

Ignitroanele au două aplicații principale:

- redresarea și inversiunea;
- întreruperea sincronă a curentului alternativ.

Prima categorie de aplicații comportă o sarcină continuă și prezintă o probabilitate redusă de apariție a arcurilor inverse.

A doua categorie de aplicații comportă o funcționare intermitentă și conducția unor curenți de mare intensitate.

În general ignitroanele au construcții diferite după tipul de aplicație.

În fig. 70 este arătată schema de principiu a utilizării ignitronului într-un montaj de redresare monofazat dublă-alternanță. Sînt reprezentate în figură și formele de undă ale tensiunii și curenților din circuit în ipoteza unei rezistențe nule în circuitul de sarcină.

În fig. 71 este arătată schema de principiu a utilizării ignitronului într-un montaj inverter monofazat dublă-alternanță, în care energia de curent continuu dată de un generator de curent continuu se transformă în energie de curent alternativ, pentru alimentarea unui motor sincron. Sînt reprezentate și aci formele de undă ale tensiunii și curenților din circuit în ipoteza unei rezistențe nule în circuit. În fig. 72 este arătată schema de principiu a unui comutator sincron în care două ignitroane permit pe rînd trecerea curentului alternativ prin primarul unui transformator de sudură prin rezistență. Printr-o comandă potrivită pe electrodul de aprindere al ignitroanelor se poate regla valoarea eficace a curentului alternativ. Formele de

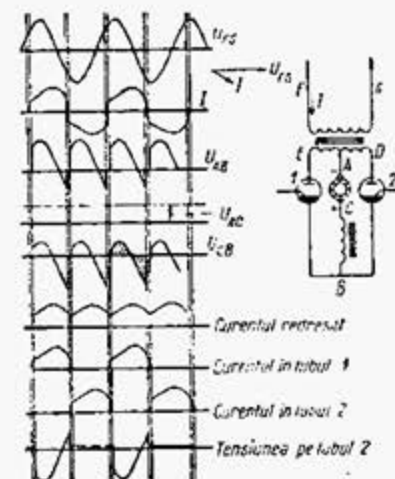


Fig. 70. - Schema de principiu și forma de undă a un redresor monofazat dublă-alternanță cu ignitroane. Rezistența din circuit se presupune nulă.

undă ale tensiunilor și curenților din circuit reprezentate în figură corespund unei sarcini cu factorul de putere nul. Se vede că dacă nu există întârziere la aprindere, curentul din circuit rămâne sinusoidal, iar când există întârziere, la aprindere curentul are întreruperi și este format din arcuri de sinusoidă.

α) *Ignitroane de tensiune joasă pentru redresare.* Ignitroanele pentru redresare au între anod și catod apărători necesare deionizării. Aceste apărători pot sau nu să fie legate la circuite externe prin borne sigilate. Rolul apărătorilor este de a feri anodul de influența catodului, devinând particulele de viteză mare și oferind suprafețe pe care ionii să se poată recombina cu electroni și să se neutralizeze.

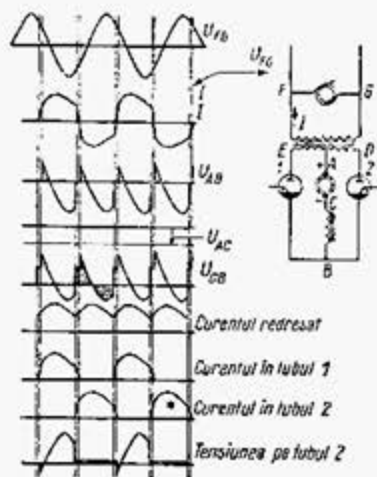


Fig. 71. — Schema de principiu și forma de undă la un invertor monofazat dublu-alternanță cu ignitroane, alimentat de la un motor de curent continuu și acționind o mașină sincronă. Rezistența din circuit se presupune nulă.

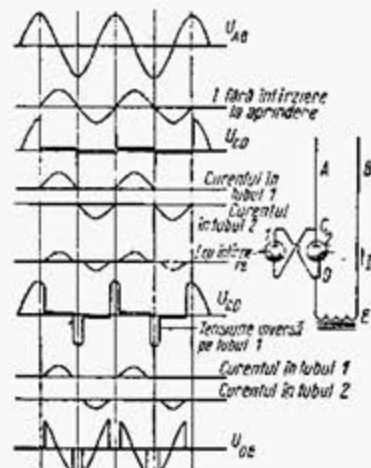


Fig. 72. — Schema de principiu și forma de undă la un comutator sincron cu ignitroane în circuitul unui transformator de sudare prin rezistență. Se presupune cazul unui factor de putere nul.

În fig. 73 este arătată o secțiune printr-un ignitron vidat (sigilat), destinat funcționii de redresare la o tensiune de 300–600 V. În datele tubului se indică un curent mediu nominal I_d pentru o funcționare continuă nelimitată sau un curent $1,5I_d$ pentru o funcționare continuă de două ore sau $2I_d$ pentru o funcționare de 1 minut. Curentul nominal I_d depinde de tensiunea nominală a tubului și scade când tensiunea crește. Alte date nominale sînt similare cu datele tuburilor cu gaze și catod cald. În unele tipuri de ignitroane există un anod auxiliar care lungeste timpul în care există pata catodică pe baia de mercur pentru a ușura trecerea arcului pe anodul principal al ignitronului. Astfel de ignitroane sînt necesare cînd se folosesc în circuitul de aprindere tensiuni în impulsuri.

β) *Ignitroane de tensiune înaltă pentru redresare.* S-au construit ignitroane pentru circuite redresoare de 10 și 20 kV. Tuburi cu tensiune nominală atât de ridicată s-au putut obține prin introducerea de grile divizoare de tensiune care reduc lungimea căii conductive pe care se aplică tensiunea inversă. În fig. 74 este reprezentată o secțiune printr-un ignitron-pentodă tip G1-506, avînd pe traiecul arcului principal cinci electrozi: anodul, catodul de mercur și trei grile intermediare.

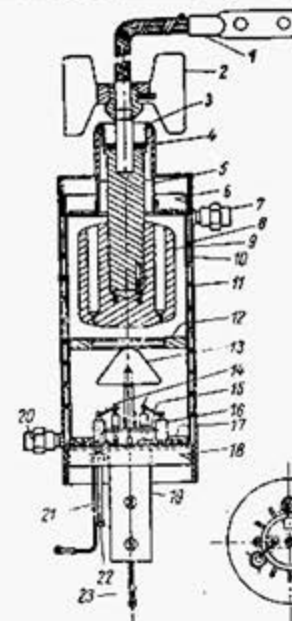
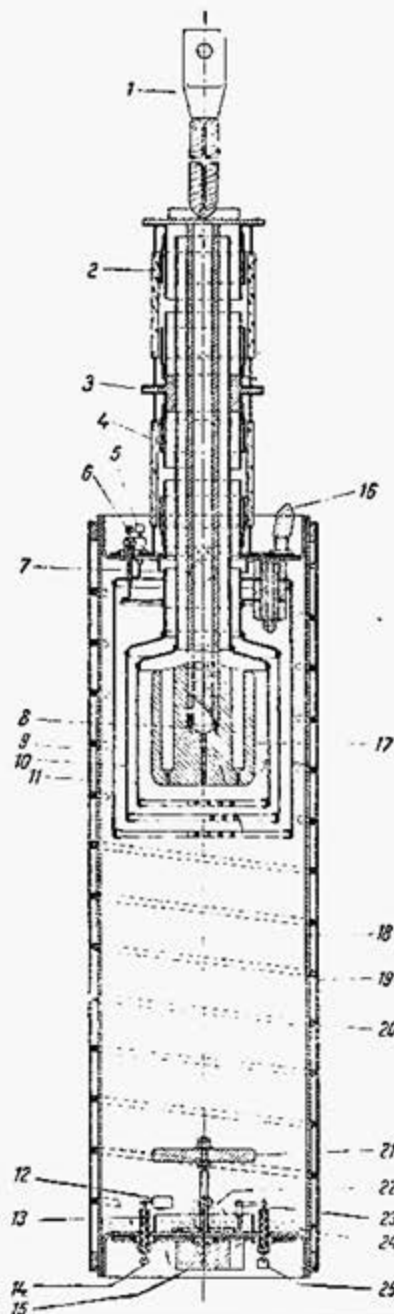


Fig. 73. — Ignitron pentru instalații de redresare:

1 — borna anodului; 2 — radiator; 3 — capac din Kovar; 4 — bucsă din sticlă; 5 — manșon din Kovar; 6 — oțel; 7 — ieșirea apei; 8 — spirală pentru ghidarea apei; 9 — anod din grafit; 10 — cilindru interior din oțel inoxidabil; 11 — cămașă pentru apă din oțel inoxidabil; 12 — inel din oțel contraștopirii; 13 — apărătoare de grafit; 14 — electrozi de aprindere; 15 — inel de limitare a arcului; 16 — apărătoare din molibden; 17 — baie de mercur; 18 — oțel; 19 — borna catodului; 20 — intrarea apei; 21 — borna electrodului de aprindere; 22 — tub de evacuare; 23 — borna anodului auxiliar; 24 — anod auxiliar.

Fig. 74 — Ignitron pentodă pentru 20 000 V, 200 A:

1 — borna anodului; 2 — bucsă izolatoare; 3 — borna intermediară a anodului; 4 — bucsă izolatoare; 5 — borna grilei-ecran; 6 — borna grilei de comandă; 7 — ieșirea apei; 8 — știfturi de fixare a anodului; 9 — grile-ecran; 10 — grile de comandă; 11 — anod intermediar; 12 — anod auxiliar pentru menținerea arcului; 13 — inel pentru arc de mercur; 14 — borna anodului auxiliar; 15 — borna catodului; 16 — orificiu de evacuare, închis; 17 — anod; 18 — cilindru interior; 19 — cilindru exterior; 20 — spirală pentru ghidarea apei; 21 — apărătoare contra ștopirii cu mercur; 22 — intrarea apei; 23 — electrod de aprindere; 24 — mercur; 25 — borna electrodului de aprindere.



Acest tub permite să se obțină o tensiune redresată de 20 000 V și un curent de 200 A. Ele prezintă o realizare modernă în domeniul tuburilor cu arc de mercur și tensiune mare. Utilizarea sa în circuite de redresare și inversiune va deschide noi posibilități în distribuția și controlul energiei electrice.

γ) *Electrozii de aprindere la ignitroane pentru redresare.* Se prevăd doi electrozi de aprindere pentru motivul că la aplicațiile de redresare funcționarea este de obicei continuă și solicitarea electrodului de aprindere este mare. Tubul poate funcționa satisfăcător și cu un singur electrod de aprindere, astfel încât se pot utiliza ambii electrozi simultan sau numai unul, celălalt fiind de rezervă. Alegerea între cele două moduri de utilizare se face după indicațiile experienței pentru a obține o durată de serviciu mai mare.

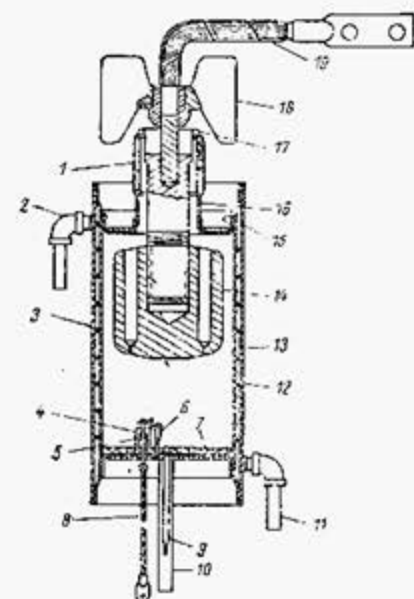


Fig. 75. — Ignitron pentru instalații de sudură:

1 — bucsă de sticlă; 2 — ieșirea apei; 3 — spirală pentru încălzirea apei; 4 — apărătoare din molibden; 5 — legătură etanșă de Kovar — sticlă; 6 — electrod de aprindere; 7 — baze de mercur; 8 — borna electrodului de aprindere; 9 — tub de evacuare; 10 — borna catodului; 11 — intrarea apei; 12 — câmășă de apă din oțel inoxidabil; 13 — cilindru interior din oțel inoxidabil; 14 — anod din grafit; 15 — oțel; 16 — manșon de Kovar; 17 — capac din Kovar; 18 — radiator; 19 — borna anodului.

ecrane între anod și catod din cauză că prezența lor în calea unor curenți foarte mari ar produce o cădere de tensiune mare pe arc. Ecranele nu sînt necesare nici pentru a micșora posibilitatea apariției arcurilor inverse. La o instalație de sudură apariția unui arc invers nu pune în scurtcircuit transformatorul ca în cazul redresoarelor, deoarece comutatorul sincron este în serie cu transformatorul. În fig. 75 se arată o secțiune printr-un ignitron pentru sudură.

δ) *Ignitroane pentru comanda aparaturii de sudură.* S-a arătat în fig. 72 forma de undă a tensiunii și curentului la două ignitroane funcționând ca un comutator sincron. Tensiunile directe și inverse care se aplică unui tub depind de întârzierea la aprindere. Dacă nu există întârziere la aprindere, tensiunea care apare pe un tub după oprirea conducerii are doar valoarea necesară pentru ca să se producă aprinderea celui alt tub, cu excepția sfîrșitului unui interval de lucru al transformatorului de sudură, cînd comutatorul sincron trebuie să blocheze întreaga tensiune de linie.

Dacă tubul funcționează cu întârziere la aprindere, sfîrșitul perioadei de conducție pe un tub este urmat de aplicarea bruscă a unei tensiuni inverse. Jumătate perioadă mai tîrziu tubul trebuie să blocheze o tensiune directă de aceeași mărime.

Dacă impedanța prezentată de transformatorul de sudură este constantă, întârzierea la aprindere produce micșorarea curentului și în acest mod se reduce și încălzirea tubului, dar în același timp crește durata de aplicare a tensiunii inverse. Tubul funcționează în condițiile cele mai grele cu o impedanță de sarcină dată, cînd întârzierea la aprindere pe electrodul de aprindere este de 10° .

Toate datele nominale ale ignitronului se dau în sus pentru o funcționare fără întârziere la aprindere, sau o conducție pe întreaga perioadă a curentului alternativ. La aceste ignitroane nu se folosesc

39. *Date nominale pentru ignitroanele aparatelor de sudură.* Alegerea unui ignitron pentru un comutator sincron care controlează o instalație de sudură se face pe baza curentului mediu I_d care trebuie să treacă prin tub și a timpului de conducție t_c cit durează trecerea curentului. Aceste două mărimi determină de fapt încălzirea tubului. Energia disipată în tub și transformată în căldură este:

$$W = \Delta U_a \cdot I_d \cdot t_c, \quad (39.1)$$

în care ΔU_a este căderea de tensiune pe tub și se poate considera constantă pentru intervalul normal de valori ale curentului.

Pentru fiecare tip de tub se specifică un curent nominal I_{dn} și un timp de conducție nominal t_{cn} în care el poate curge fără ca încălzirea tubului să depășească limitele admise, cu răcirea indicată. După o perioadă de conducție de durată t_{cn} se presupune o perioadă egală de repaus înainte de începerea unei noi perioade de conducție. Cînd același tub se utilizează la o tensiune dublă, energia permisă să se disipe în tub și încălzirea care rezultă sînt reduse la jumătate. În consecință, cantitatea de electricitate trecută prin tub se reduce la jumătate, iar la același curent I_{dn} timpul de conducție devine $\frac{1}{2} t_{cn}$.

Dacă se presupune o funcționare a comutatorului sincron fără întârziere la aprindere, curentul prin tub are exact forma unei jumătăți de sinusoidă, astfel încît între valoarea eficace I_l a curentului alternativ pe linie (și în primul transformator de sudură) și valoarea medie a curentului prin tub există relația:

$$I_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_l. \quad (39.2)$$

Timpul de conducție t_c în care se permite trecerea curentului I_l prin ignitron se deduce scriind egalitatea energiilor sau a cantităților de electricitate trecute prin ignitron:

$$I_d \cdot t_c = I_{dn} \cdot t_{cn}, \quad (39.3)$$

sau înlocuind pe I_d din relația (39.2):

$$t_c = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{dn}}{I_l} \cdot t_{cn}. \quad (39.4)$$

Se utilizează în prezent un sistem formal de date nominale pentru ignitroanele folosite în instalațiile de sudură. Acest sistem este conceput să asigure o serie de tuburi care să acopere în mod rațional întregul domeniu de aplicare. În tabela 8 sînt trecute datele nominale pentru patru tipuri curenți de ignitroane.

Tabela 8. Date nominale pentru ignitroanele aparatelor de sudură

Tipul ignitronului	S_{max} kVA	I_{dn} A/tub	$U_l = 250$ V			$U_l = 500$ V		
			I_{lmax} A	t_{cn} s	t_{cn} As	I_{lmax} A	t_{cn} s	t_{cn} As
WL-681/686	300	23	1 200	22	500	600	11	250
WL-652/657	600	58	2 400	18	1 000	1 200	9	50
WL-651/656	1 200	145	4 800	14	2 000	2 400	7,1	1 000
WL-655/658	2 400	360	9 600	11	4 000	4 800	5,6	2 000

Puterea aparentă $S_{max} = U_l \cdot I_{lmax}$ trecută prin comutatorul sincron crește de la un tip la altul în progresie geometrică cu rația 2. La această putere corespunde un curent de linie maxim $I_{lmax} = \frac{S_{max}}{U_l}$ diferit, după tensiunea de linie utilizată ($U_l = 250$ V sau $U_l = 500$ V); valorile curentului cresc în aceeași progresie ca și puterea.

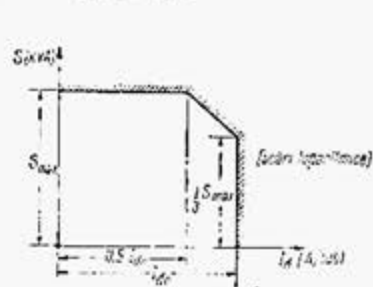


Fig. 76. — Diagramă principală stabilind limitele admisibile pentru puterea aparentă și curentul mediu la ignitroanele din instalațiile de sudură.

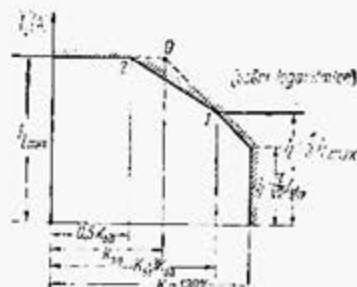


Fig. 77. — Diagramă principală stabilind limitele admisibile pentru curentul de sarcină și factorul de serviciu la ignitroanele din instalațiile de sudură.

Curentul mediu nominal I_{dn} crește în progresie geometrică cu rația 2,5, timpul de conducție t_{cn} scade în progresie geometrică cu rația 0,8, iar cantitatea de electricitate trecută prin tub $Q_n = I_{dn} \cdot t_{cn}$ crește în progresie geometrică cu rația 2. Cifrele date în tabelă sînt rotunjite, de aceea nu trebuie căutată o corespondență riguroasă între diferitele valori. Pentru utilizarea acestor date nominale se indică două diagrame formale de tipul celor din fig. 76 și fig. 77 în coordonate logaritmice.

Diagrama din fig. 76 arată relația dintre puterea aparentă maximă (S_{max}) trecută prin comutatorul sincron și curentul mediu maxim prin tub (I_{dmax}). O pereche de valori S_{max} și I_{dmax} trebuie să dea un punct care să nu cadă dincolo de limita diagramei.

Diagrama din fig. 77 arată relația dintre curentul de linie I_l ce trece prin comutatorul sincron și factorul de serviciu k_s . Factorul de serviciu este definit de relația:

$$k_s = \frac{I_c}{I_{cn}}$$

El arată în ce proporție trebuie să scadă timpul de conducție în tub cînd curentul mediu I_d crește peste curentul mediu nominal I_{dn} . Pentru cele patru tipuri de ignitroane indicate în tabela 8 sînt date în fig. 78, 79 și 80 diagrame corespunzătoare celor din fig. 76 și 77.

Date nominale pentru electrozii de aprindere. Pentru ca electrodul de aprindere să-și poată împlini rolul (aprinderea ignitronului pe traiectul anod-catod), este necesar ca valorile instantanee ale tensiunii aplicate electrodului și curentului ce-l străbate să depășească o limită inferioară dată.

Deoarece intervalul dintre electrodul de aprindere și baia de mercur nu este o simplă rezistență, raportul dintre valorile limită ale tensiunii și curentului nu este

constant. Aprinderea se poate produce și la tensiuni mai mari și curenți mai mici decît cele normale cum și la tensiuni mai mici și curenți mai mari decît cele normale. De exemplu ignitronul FG-238 se poate aprinde cu 200 V—25 A la electrodul de aprindere sau cu 350 V—10 A sau cu 100 V—35 A.

În general pentru ignitroanele destinate instalațiilor de sudură datele nominale ale electrodului de aprindere sînt 200 V—30 A. Pentru ignitroanele destinate instalațiilor de redresare 75—125 V și 15—20 A.

Deși aceste valori reprezintă o putere electrică importantă, energia efectiv consumată pentru aprindere este foarte mică, deoarece timpul în care se produce aprinderea tubului este foarte scurt, de obicei 20—100 microsecunde. După aprinderea ignitronului este inutil să mai fie alimentat electrodul de aprindere. Aceasta ar încălzi și ar uza prea mult vârful electrodului; de aceea tensiunea aplicată are de obicei o formă de impuls, după cum se va vedea în paragraful următor.

40. Ignitroane pompate. Ignitroanele pompate se utilizează cînd se cer

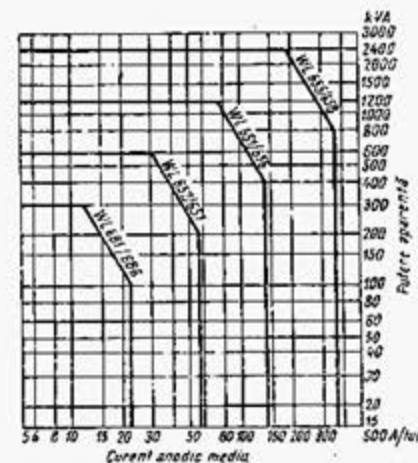


Fig. 78. — Limite admisibile pentru puterea aparentă și curentul mediu la ignitroanele din instalațiile de sudare. Tensiunea de linie 250—500 V.

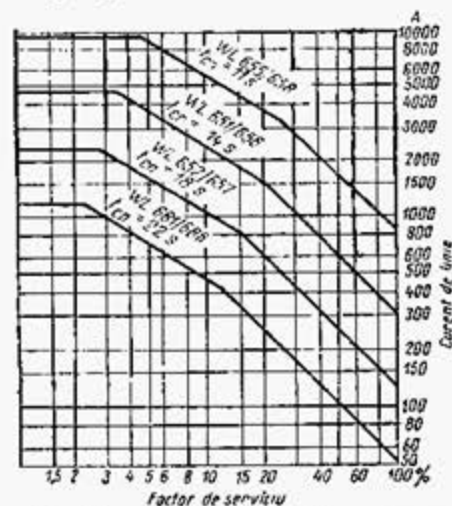


Fig. 79. — Limite admisibile pentru curentul de sarcină și factorul de serviciu la ignitroanele din instalațiile de sudare. Tensiunea de linie 250 V.

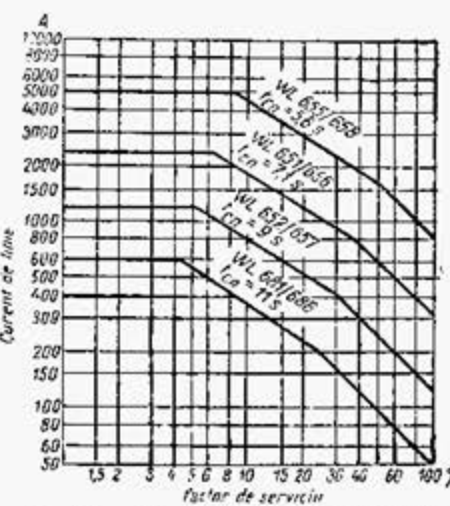


Fig. 80. — Limite admisibile pentru curentul de sarcină și factorul de serviciu la ignitroanele din instalațiile de sudare. Tensiunea de linie 500 V.

curenți redresați foarte mari, ca în aplicațiile din tracțiune, oțelării, industria electrochimică și industria minieră. Pe cînd ignitroanele sigilate se folosesc la tensiuni de 125—600 V, ignitroanele pompate pot funcționa cu tensiuni pînă la 900 V. Peste

900 V se utilizează, în general, redresoare polianodice. Principiul de funcționare al unui ignitron pompat din punct de vedere electronic este identic cu al ignitronului sigilat, construcția însă diferă destul de mult.

Recipientul este un cilindru de oțel cu diametrul până la 400 mm. Capacul este fixat de recipient printr-o serie de șuruburi, iar etanșarea se face prin garnituri de cauciuc sau aluminiu. Borna anodului trece printr-o bucsă izolantă din micalex, care în același timp servește și pentru etanșare.

Etanșarea nefiind satisfăcătoare este necesar să se pompeze continuu resturile de gaz care pătrund în recipient.

Anodul este de grafit ca la toate redresoarele de curent mare. La ignitroane mari, anozii sînt prevăzuți cu rezistențe de încălzire, pentru ca temperatura anodului să se mențină la o valoare ridicată în orice regim de funcționare și vaporii de mercur să nu se poată condensa pe anod.

Se întrebuințează mai multe metode de răcire. Recipientul se prevede cu o manta de apă, în interiorul căreia se așază o șicană în spirală care mărește viteza de circulație a apei, sau se aplică pe suprafața laterală a recipientului o serie de țevi de răcire din cupru. În ambele cazuri, apa de răcire este trimisă sub presiune, cu ajutorul unei pompe.

Instalația de vid este la fel ca la redresoarele polianodice. Construcția electrodului de aprindere la ignitroanele pomplate este mult diferită față de ignitroanele sigilate, după cum se poate vedea în fig. 81.

Amorsarea acestui ignitron se face cu ajutorul electrodului de aprindere 12, care primește un timp scurt o tensiune de comandă; arcul format trece apoi

la anodul auxiliar 27, iar electrodul de aprindere este lăsat inactiv pentru a nu se consuma vârful său.

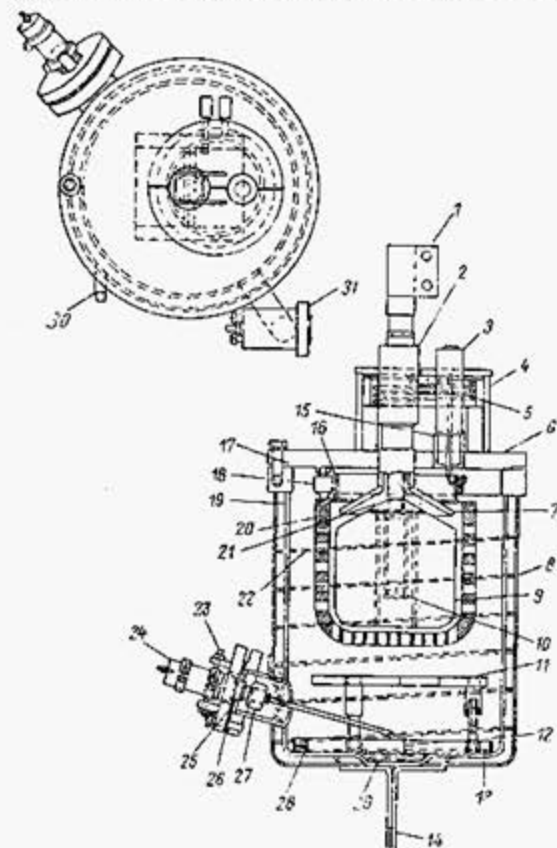


Fig. 81. - Secțiune printr-un ignitron pompat: 1 - borna anodului; 2 - izolatorul anodului (micalex); 3 - izolatorul grilei (micalex); 4 - carcasa încălzitorului anodului; 5 - încălzitorul anodului; 6 - capacul cuvei cu vid înalt; 7 - ecran termic; 8 - manta de apă; 9 - anod de grafit; 10 - țija anodului; 11 - apărătoare contra stropirii cu mercur; 12 - vârful electrodului de aprindere; 13 - întoarcerea mercurului condensat; 14 - borna catodului; 15 - suduri etanșe; 16 - inel de susținere; 17 - garnituri de aluminiu și email; 18 - izolator; 19 - cuva cu vid înalt; 20 - grila de deionizare; 21 - distanțierii; 22 - șicană în spirală pentru dirijarea apei; 23 - șuruburi de reglaj; 24 - izolator pentru electrodul de aprindere și anodul auxiliar; 25 - etanșare flexibilă (permite reglajul adâncirii electrodului de aprindere în mercur); 26 - garnituri de aluminiu și email; 27 - anod auxiliar; 28 - separatorul de mercur; 29 - baie de mercur (catodul).

Dacă potențialele anodului 9 și grilei 20 au valorile corespunzătoare funcționării normale, se formează arcul principal între baia de mercur și anodul 9. Acest arc nu se poate menține, dacă în circuitul anodic curentul scade sub o anumită valoare; atunci rămâne în ignitron numai arcul pe anodul auxiliar.

Grila 20 servește ca apărătoare a anodului și contribuie la micșorarea timpului de deionizare; ea poate fi însă utilizată și ca electrod de comandă pentru reglajul curentului redresat.

41. Excitronul. Excitronul este un tub redresor monoanodic cu arc de mercur, de construcție modernă. Funcționarea sa este similară cu a redresorului polianodic

cu arc de mercur, deosebirea esențială constînd numai în existența unui singur anod. Numele de excitron, consacrat în literatura tehnică modernă, derivă din existența anodului de excitație.

În fig. 82 este arătată secțiunea longitudinală într-un excitron. În partea de jos a vasului cilindric de oțel 1 în care este vid înalt, se găsește baia de mercur 2, care constituie catodul. Această parte a rezervorului este prevăzută cu o cămașă de răcire cu apă 3. În partea de sus a rezervorului cilindric este prevăzută o flanșă 4, care susține anodul. Îmbinarea este etanșată prin garnitura 5. Anodul de grafit 6 este fixat pe un electrod metalic, care trece prin izolatorul de porțelan 7. Pentru asigurarea etanșeității între izolatorul 7 și electrodul metalic pe de o parte și flanșă pe de altă parte, se întrebuințează dispozitive de etanșare cu mercur 8. În partea de sus a electrodului este așezat un radiator metalic 9, care ușurează degajarea căldurii disipate de anod.

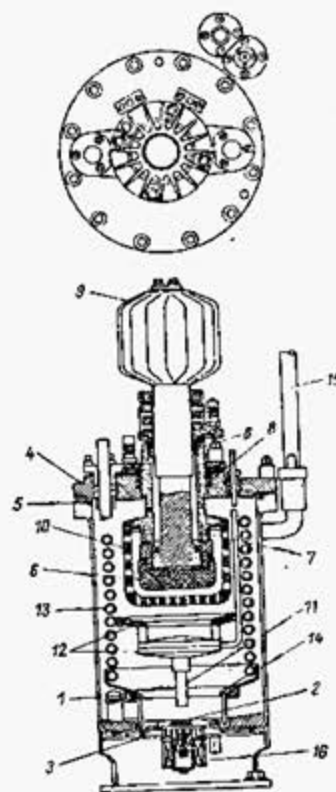


Fig. 82. - Secțiune printr-un excitron.

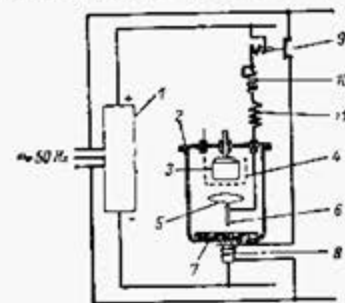


Fig. 83. - Schema circuitului de excitație al unui excitron.

În apropierea anodului se află grila de comandă 10, formată dintr-un cilindru de grafit perforat, care este fixat tot pe izolatorul 7. În partea de jos a vasului, deasupra băii de mercur, se află anodul de aprindere și excitație 11 și ecranele de grafit 12. Anodul 11 servește pentru menținerea unui arc la suprafața mercurului. Acesta se formează cu ajutorul unei tensiuni auxiliare de aproximativ 100 V aplicată între anodul 11 și catodul 2, furnizată de un redresor uscat de mică putere.

În fig. 83 este arătată schema circuitului pentru amorsarea excitronului. Sînt indicate: sursa auxiliară de curent continuu 1 (de exemplu un redresor cu

seleniu), excitronul 2, anodul principal 3, grila de comandă 4, ecranul de protecție 5, anodul auxiliar sau de excitație 6, baia de mercur 7 și solenoidul de acționare a dispozitivului de amorsare a arcului 8. La punerea sub tensiune a instalației, întreruptorul 9 este închis și dispozitivul de aprindere face să apară arc pe anodul auxiliar, așa cum se va explica mai departe. Îndată ce apare curentul între anodul 6 și catodul 7, întreruptorul 9 se deschide și oprește curentul în solenoidul 8. Rezistența 10 și reactorul 11 limitează șocul de curent și valoarea medie a curentului prin anodul auxiliar.

Când arc se formează, apare la suprafața mercurului o pată luminoasă, care denotă o puternică ionizare a mediului și care provoacă evaporarea intensă a mercurului și menține o atmosferă cu vapori de mercur în tub. De îndată ce tensiunea pe anodul principal devine pozitivă în raport cu catodul, și depășește circa 30 V, ionizarea din jurul anodului auxiliar se extinde până la anodul principal și apare arc între acesta și baia de mercur. Spațiul dintre pata catodică și anod (plasma) este ocupat de ioni pozitivi și electroni, care se mișcă spre catod și anod, cu mișcări relativ lente și dezordonate. Rezistența acestui spațiu la trecerea curentului și căderea de tensiune este foarte mică, plasma putându-se considera ca un conductor. La pata catodică se formează o puternică acumulare de ioni pozitivi; între aceasta și catod apare o diferență de potențial de aproximativ 20–30 V, care împreună cu mica diferență de potențial de-a lungul plasmăi, reprezintă căderea de tensiune pe întregul tub.

Când tensiunea anodică devine negativă, curentul anodic încetează sau se reduce la o valoare extrem de mică (acesta este așa-numitul curent invers, care la excitron nu depășește de obicei câteva sutimi de amper). În această situație, ionii pozitivi din plasmă încep să se recombine cu electronii, ceea ce constituie procesul de deionizare a tubului, a cărui durată depinde de concentrația inițială de ioni. Dacă în acest timp, tensiunea negativă atinge o valoare mare, înainte ca deionizarea să se fi produs în mod efectiv, tubul se poate aprinde în sens invers. Această aprindere inversă poate coincide cu momentul în care tubul vecin dintr-o schemă de redresare polifazăată conduce normal; atunci înfășurarea secundară corespunzătoare a transformatorului se pune practic în scurtcircuit, doi anodi de potențial foarte diferit fiind puși în legătură prin arcurile de mercur.

Tensiunea de aprindere inversă crește o dată cu micșorarea densității vaporilor de mercur sau a temperaturii. Presiunea necesară a vaporilor de mercur se poate menține în limitele acceptabile prin răcirea artificială a vaporilor cu ajutorul serpentinei 12, (fig. 82) parcursă de apa de răcire. Vaporii de mercur se condensează pe serpentină, formând picături care cad într-un jgheab înel 14, prin orificiile căruia se întorc în baia de mercur. Astfel, în timpul funcționării excitronului, se produce neconștient evaporarea și condensarea mercurului și se menține o anumită presiune a vaporilor de mercur în interiorul tubului. Prin țeava de oțel 15 sudată cu rezervorul, excitronul este legat la un sistem de vacuum care folosește o pompă rotativă de vid și o pompă de difuzie, prin care se poate menține în interiorul tubului un vid de aproximativ 10^{-5} mm col. Hg.

Pentru amorsarea arcului între anodul auxiliar 11 și catodul 2, se întrebuințează un dispozitiv special 10, așezat pe fundul rezervorului.

În fig. 84 a și b se arată secțiunea prin acest dispozitiv. Un cilindru cu pereții subțiri 1, sudat la corpul rezervorului excitronului, este așezat în centrul bobinei 2.

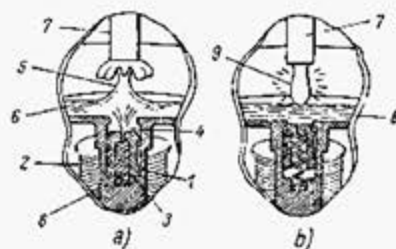


Fig. 84. — Dispozitivul de amorsare a arcului.

Când în bobina 2 trece un curent continuu, un piston mobil de oțel 3 (sub forma unui tub cu orificiu în partea de sus) se magnetizează și se deplasează rapid în jos, fiind condus de pereții cilindrului 1. Mercurul care umple cilindrul este împins prin ajutorul 4 în partea de sus a pistonului, formând un jet de mercur, care stabilește legătura între catodul 6 și anodul de aprindere 7. Acest moment este arătat în fig. 84a. După întreruperea curentului din bobina 2, pistonul revine în poziția inițială, sub acțiunea arcului 8. Deplasarea aceasta este sprijinită și de tendința de plutire a pistonului la suprafață, din cauza greutății specifice mai mici a oțelului decât a mercurului.

În partea de sus a cilindrului 1 se află o muchie, care oprește pistonul. În timpul funcționării tubului, se menține între catodul 6 și anodul auxiliar 7 în permanență, un arc 9 (fig. 84b).

În fig. 85 se arată o secțiune prin redresorul monoanodic cu arc de mercur (excitron) RMNV-550 construit de fabrica Ural Aparat.

Acest redresor are un dispozitiv de excitație continuă iar dispozitivul de aprindere este constituit dintr-o pompă electromagnetă cu piston care la pornirea redresorului provoacă o ținută de mercur din baia catodică la anodul de aprindere. La ruperea contactului se produce un arc electric care provoacă o ionizare a vaporilor de mercur și deci aprinderea anozilor de excitație și a anodului principal.

În fig. 86 este arătat redresorul RMNV-500-6 care este un ansamblu din șase elemente monoanodice debitând 750 A la 1 650 V, sau 500 A la 3 300 V. În cazul întrebuințării a 12 elemente în loc de șase, intensitățile arătate mai sus se dublează.

c) Circuite pentru aprinderea sau amorsarea ignitroanelor

42. Scheme cu redresor de aprindere. În fig. 87 este reprezentat cel mai simplu circuit de aprindere cu redresor necomandat. Electrodele de aprindere al ignitronului este intercalat în circuitul anodic al unui gazotron de mică putere.

Când valoarea instantanee a tensiunii de alimentare atinge potențialul de aprindere al gazotronului u_{ag} (fig. 88), gazotronul se aprinde și lasă să treacă prin electrodul de aprindere un curent i_0 ; o scintilă apărută între mercur și electrodul de aprindere în urma trecerii curentului i_0 , se transformă repede într-un arc între anodul și catodul ignitronului.

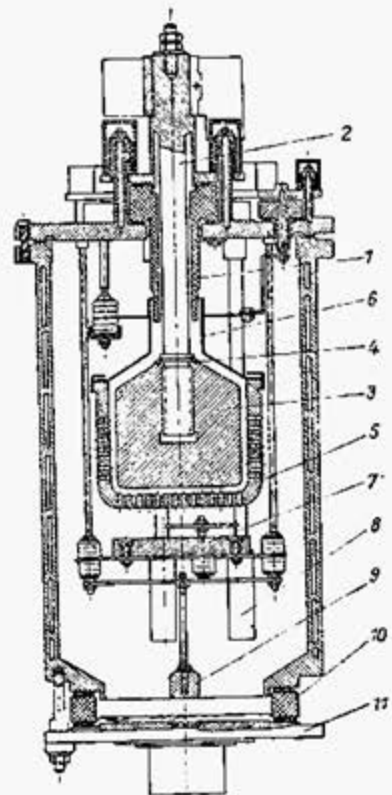


Fig. 85. — Secțiune prin redresorul (excitron) RMNV-550:

1 — izolatul anodului; 2 — tija anodului; 3 — capul anodului; 4 — rondelă; 5 — grilă; 6 — coroană; 7 — ecran; 8 — anod de excitație; 9 — anod de aprindere; 10 — izolatul catodului; 11 — baza catodului.

Din momentul apariției arcului în ignitron, gazotronul se stinge, deoarece căderea de tensiune Δu_a între anodul și catodul ignitronului este mai mică decât suma căderilor de tensiune pe gazotron și pe intervalul molecular dintre electrodul de aprindere și baia de mercur. Rolul gazotronului se limitează la declanșarea arcului în ignitron, cteva momente după ce tensiunea de alimentare devine pozitivă. În fig. 88 este reprezentată forma de undă a tensiunii la bornele ignitronului u_a și a curentului prin ignitron i_a , cu ajutorul cărora se poate înțelege succesiunea momentelor de aprindere a gazotronului și ignitronului.

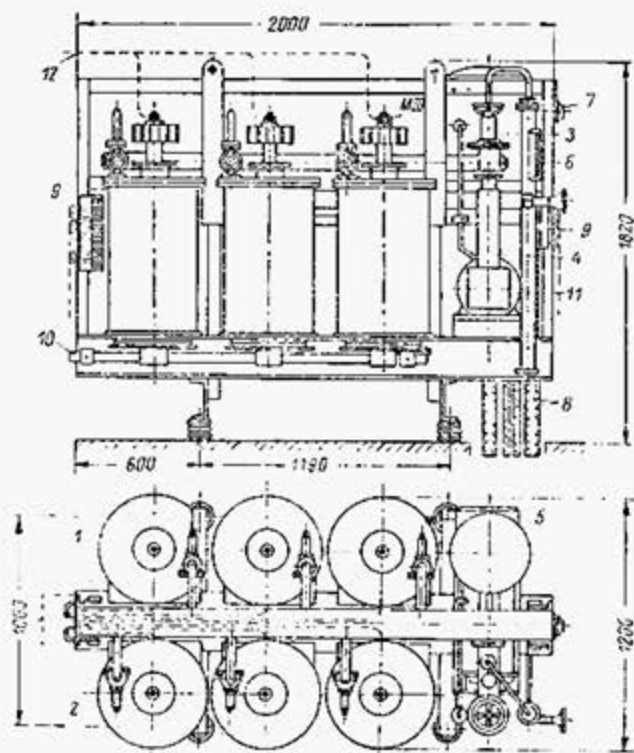


Fig. 86. — Redresorul RMNV-500-6 (dispoziția de ansamblu): 1 — redresor monoanodic (excitron); 2 — ventilul de vid; 3 — ventilul comun de vid; 4 — pompă de mercur; 5 — pompă cu anticameră de vid; 6 — manometru cu mercur; 7 — semnalizator termic; 8 — furtunuri de cauciuc pentru răcire; 9 — tablourile circuitelor auxiliare; 10 — conductori catodici; 11 — motorul electric.

Unghiul corespunzător intervalului de timp de la t_1 la t_2 în cursul căruia tensiunea de alimentare variază de la zero până la tensiunea de aprindere a gazotronului u_{ag} este unghiul de aprindere al gazotronului α_{ag} , iar unghiul corespunzător intervalului de timp de la t_2 la t_3 în cursul căruia curentul trece prin electrodul de aprindere și se produce ionizarea ignitronului, este unghiul de aprindere al ignitronului α_{i0} .

În acest fel unghiul de aprindere al ansamblului ignitron și circuit de aprindere este suma unghiurilor de aprindere individuale:

$$\alpha_a = \alpha_{ag} + \alpha_{i0}.$$

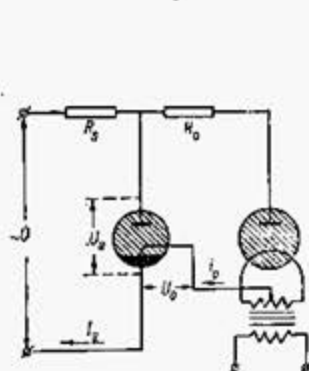


Fig. 87. — Circuit de aprindere propriu cu gazotron.

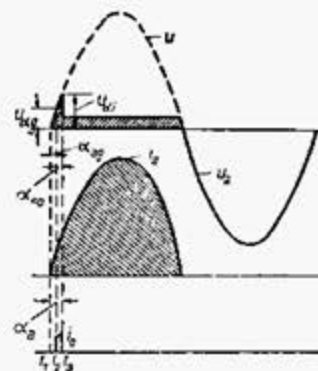


Fig. 88. — Diagrama tensiunii și curentului în schema de aprindere cu gazotron.

Pentru a regla valoarea medie a tensiunii redresate a ignitronului, un mijloc posibil este înlocuirea gazotronului printr-un tiratron, care, fiind comandat pe grilă, permite reglarea momentului de apariție a curentului de aprindere prin ignitron.

În fig. 89 este reprezentat un circuit de aprindere propriu comandat prin tiratron.

Pentru comanda unghiului de aprindere a tiratronului însuși se poate folosi oricare din circuitele de comandă descrise la § 25.

Curentul în circuitul de aprindere al ignitronului apare în momentul cind cu ajutorul comenzii pe grila tiratronului, acesta devine conducător.

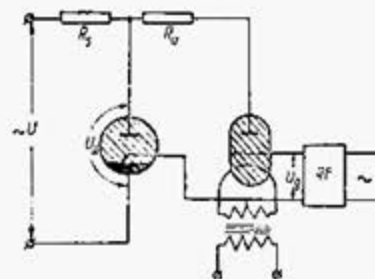


Fig. 89. — Circuit de aprindere propriu cu tiratron.

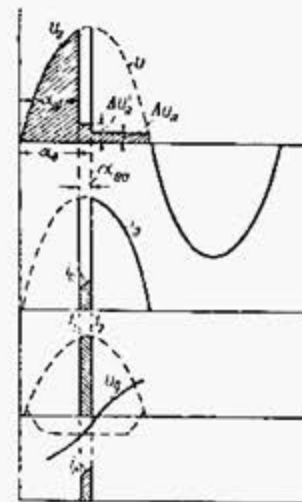


Fig. 90. — Diagrama curentului și tensiunii la circuitul de aprindere cu tiratron.

În fig. 90 sînt reprezentate curbele de variație a tensiunii anodice și a curentului ignitronului, de asemenea curentul în circuitul de aprindere i_0 .

Curentul i_0 apare în momentul t_1 corespunzător unghiului de aprindere al tiratronului α_{at} . Într-un interval de timp scurt de la t_1 la t_2 , care corespunde unghiului de aprindere al ignitronului α_{av} , are loc formarea petei catodice și ionizarea ignitronului.

În acest fel unghiul de aprindere al ansamblului ignitron-tiratron este determinat de suma unghiurilor α_{at} și α_{av} :

$$\alpha_a = \alpha_{at} + \alpha_{av}.$$

Se observă în figură că, atît timp cît durează curentul i_0 și arcul principal pe ignitron nu s-a format, căderea de tensiune pe tub este $\Delta U_a \approx 2\Delta U_a$, din cauză că la tensiunea tiratronului se adaugă tensiunea electrodului de aprindere: cînd apare conducția pe anodul ignitronului, căderea de tensiune scade brusc la valoarea ΔU_a , tiratronul se stinge și curentul i_0 se anulează brusc. În acest circuit de aprindere, curentul i_0 depinde de valoarea rezistenței sau impedanței de sarcină, care, dacă nu este potrivit aleasă, i_0 poate fi prea mare sau prea mic. Dacă se alege R_0 mare se poate ca aprinderea ignitronului să nu mai fie posibilă, la anumite sarcini în circuitul anodic al ignitronului. Acesta este un defect caracteristic al circuitelor de aprindere proprii.

Dacă în funcția de redresor de aprindere se folosește un element redresor semiconductor, forma de undă a tensiunilor și curenților din montaj este puțin diferită de aceea din cazul gazotronului.

Funcționarea circuitului de aprindere propriu cu element redresor semiconductor este ilustrată prin formele de undă ale curentului și tensiunii, reprezentate în fig. 91.

În intervalul de timp $t_0 - t_1$ trece un curent i_0 foarte mic prin electrodul de aprindere, care nu reprezintă un arc pe acest electrod. La momentul t_1 apare arc pe electrodul de aprindere și tensiunea sa scade brusc la valoarea ΔU_0 , iar curentul i_0 crește brusc. În intervalul $t_1 - t_2$ se produce ionizarea treptată a ignitronului și la momentul t_2 apare arc pe anodul ignitronului. Atunci curentul i_0 și tensiunea ΔU_0 se anulează brusc, curentul i_a apare brusc și tensiunea anodică a ignitronului scade brusc de la U_{at} (tensiunea de aprindere) la valoarea constantă ΔU_a .

Puterea cheltuită pentru aprindere este dată în fiecare moment de produsul valorilor instantanee ale curentului și tensiunii în circuitul de aprindere. Valoarea medie a acestei puteri este:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} u_0 i_0 d(\omega t).$$

Acest circuit de aprindere este influențat ca precedentul de impedanța de sarcină

și aprinderea ignitronului poate să nu se producă dacă această impedanță este prea mare.

În fig. 92 se arată funcționarea unui circuit de aprindere independent. În acest caz poate să existe un defazaj între tensiunea de alimentare U_1 și tensiunea

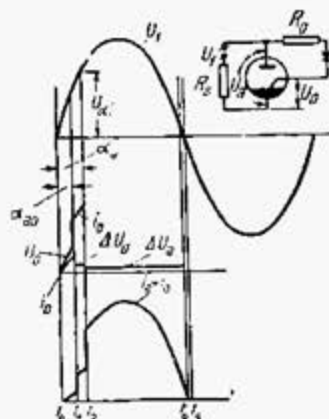


Fig. 91. — Diagrama curentului și tensiunii la circuitul de aprindere propriu cu element redresor uscat.

de comandă (de aprindere) U_2 . Dacă tensiunea U_2 este defazată înaintea tensiunii U_1 , aprinderea ignitronului se poate produce mai devreme și unghiul de aprindere α_a este mai mic.

În intervalul de timp $t_0 - t_1$ trece un curent i_0 foarte mic prin electrodul de aprindere. La momentul t_1 apare arc pe electrodul de aprindere, tensiunea sa scade brusc la valoarea ΔU_0 și curentul i_0 crește brusc, urmînd apoi o variație sinusoidală impusă de tensiunea U_2 . El se anulează la momentul t_4 cînd tensiunea

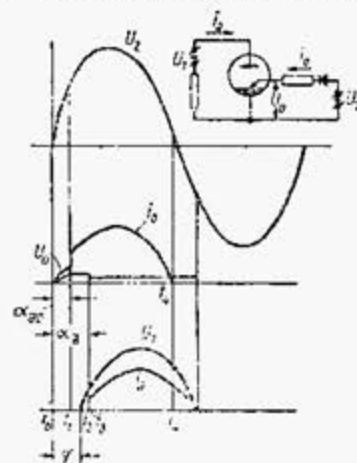


Fig. 92. — Diagrama curentului și tensiunii la un circuit de aprindere independent, cu elementul redresor uscat.

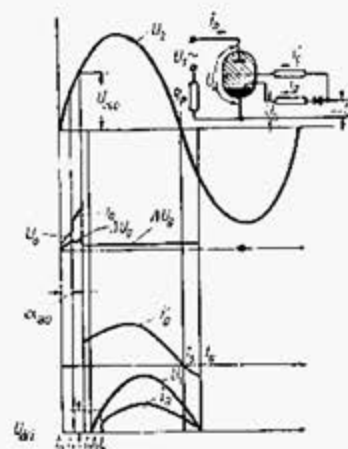


Fig. 93. — Diagrama curentului și tensiunii la un circuit de aprindere independent cu elementul redresor uscat pentru un ignitron cu electrod de șuntare.

U_2 devine mai mică decît ΔU_0 . Tensiunea U_1 de alimentare a ignitronului devine pozitivă la momentul t_2 , dar conducția pe anodul ignitronului nu poate să apară decît cînd U_1 devine mai mare decît căderea de tensiune ΔU_a pe ignitron, ceea ce are loc la momentul t_3 , curentul i_a urmînd apoi o variație sinusoidală impusă de tensiunea U_1 ; el se anulează cînd tensiunea U_1 devine mai mică decît ΔU_a .

După cum se vede din fig. 92 în circuitul de aprindere independent, arcul format între anod și catodul ignitronului nu duce la dispariția curentului în circuitul de aprindere, cum se întîmplă la circuitul de aprindere propriu.

Curentul i_0 din circuitul de aprindere se anulează numai atunci cînd tensiunea de alimentare U_2 devine mai mică decît ΔU_0 deci i_0 nu depinde de circuitul de sarcină al ignitronului.

Curba curentului i_0 din fig. 92 arată că la circuitul de aprindere independent, curentul de aprindere are o durată și o valoare medie mult mai mari decît la circuitul de aprindere propriu.

Pentru micșorarea componentei continue a curentului de aprindere, B. M. Sieapoșnikov a propus în 1940 un electrod de șuntare care se introduce în ignitron.

În fig. 93 se arată circuitul de aprindere la un ignitron cu electrod de șuntare.

Funcționarea tubului se poate înțelege din diferitele curbe de tensiune și curent reprezentate în fig. 93. La momentul t_1 apare arc la electrodul de aprindere, ceea ce face ca i_0 să crească brusc și U_0 să scadă brusc la ΔU_0 . La momentul t_2 , arc se transferă la electrodul de șuntare, cînd tensiunea U_2 are o valoare suficientă pentru ca arc să se mențină pe acest electrod, situat la o distanță mai mare

de catodul de mercur, decît electrodul de aprindere. La acest moment t_2 apare brusc curentul i_0 și se anulează brusc curentul i_a . La momentul t_3 tensiunea U_1 devine pozitivă, dar apariția curentului i_a nu se face decît la momentul t_4 , pentru că ionizarea nu se poate întinde pînă la anod în mod instantaneu. La momentul t_5 , curentul electronic i_0 se anulează și schimbă sensul, devenind un curent ionic, el nu se anulează deși tensiunea U_2 se anulează și devine negativă, deoarece odată cu i_a plasma din tub continuă să existe. La momentul t_6 tensiunea U_1 devenind mai mică decît ΔU_a , curentul i_a se anulează brusc și odată cu el curentul i_0 .

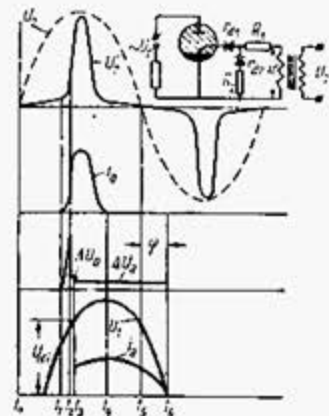


Fig. 94. — Diagrama curentului și tensiunii la un circuit de aprindere independent cu transformator de impuls și element redresor de șuntare.

În fig. 94 sînt arătate formele de undă ale tensiunilor și curenților din circuit. La momentul t_1 începe să curgă curentul i_0 prin electrodul de aprindere și valoarea sa se menține foarte mică pînă la momentul t_2 , cînd se produce aprinderea intervalului dintre electrod și mercur. În intervalul de timp de la t_2 la t_3 se produce ionizarea ignitronului și la momentul t_3 apare brusc conducția pe anodul ignitronului. Această conducție durează de la t_3 la t_6 , cînd curentul i_a se anulează pentru că tensiunea U_1 devine mai mică decît căderea de tensiune pe ignitron ΔU_a . Curentul prin electrodul de aprindere i_0 are o durată foarte mică de la t_2 — t_4 din cauza formei în impuls a tensiunii U'_2 . În felul acesta puterea absorbită în circuitul de aprindere este foarte mult micșorată și durata de serviciu a electrodului de aprindere crește.

În fig. 95 este dată schema de principiu a unui circuit de aprindere cu bobina de șoc saturată. În serie cu transformatorul de alimentare se intercalează o inductanță L_2 și elementul redresor r_{d1} . Cînd tensiunea U'_2 este pozitivă, curentul trece prin electrodul de aprindere și valoarea sa este limitată de inductanța L_2 și rezistența R . Aprinderea pe acest electrod se produce la o tensiune U_{aa} . Inducanța saturată L_1 are un miez magnetic cu un cot de saturație pronunțat. Cînd tensiunea U'_2 depășește o anumită valoare care este mai mare decît U_{aa} , inductanța L_1 scade la o valoare foarte mică din cauza saturației miezului magnetic. Șocul saturat

Electrodul de șuntare influențează funcționarea ignitronului în două sensuri. Tensiunea de aprindere a ignitronului U_{ai} scade puțin și viața electrodului de aprindere crește mult prin micșorarea duratei curentului i_0 .

43. Circuite de aprindere cu transformator de impuls și bobină de reacțanță saturată. Pentru a avea o posibilitate de control mai precisă a momentului de aprindere a ignitronului, este necesar să se aplice electrodului de aprindere o tensiune care să aibă o formă de undă cu o pantă abruptă. Obținerea unei astfel de tensiuni se realizează cu ajutorul unui transformator de impuls. În fig. 94 este arătată schema de principiu a unui circuit de aprindere cu transformator de impuls. Cînd tensiunea U'_2 este pozitivă, curentul trece prin elementul redresor r_{d1} . Rezistența R_1 limitează curentul de aprindere prin ignitron. Elementul redresor r_{d2} servește să limiteze tensiunea inversă care se aplică electrodului de aprindere în alternanța negativă a tensiunii U'_2 . Rezistența R_2 împreună cu R_1 limitează curentul în timpul alternanței negative.

poate fi privit ca un întrerupător care este deschis cît timp miezul nu s-a saturat și este închis cînd miezul s-a saturat. În felul acesta inductanța L_1 produce stingeră arcului pe electrodul de aprindere de îndată ce ea se comportă ca un scurtcircuit. Elementul redresor r_{d1} contribuie la reducerea efectului alternanței negative a tensiunii U'_2 ; de altfel inductanța L_1 intervine și la alternanța negativă, intrînd în saturație cînd tensiunea U'_2 crește și scurtcircuitînd alimentarea electrodului de aprindere.

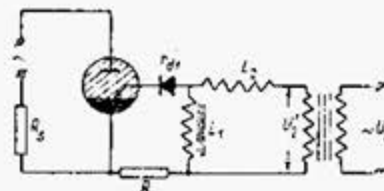


Fig. 95. — Circuit de aprindere independent cu șoc saturat.

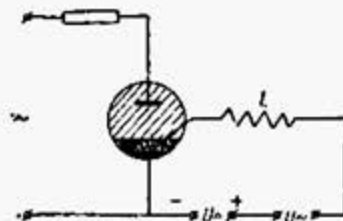


Fig. 96. — Circuit de aprindere independent cu tensiunea de aprindere combinată continuă și alternativă.

În fig. 96 se arată schema de principiu a unui circuit de aprindere independent folosind un șoc saturat și o tensiune de alimentare compusă dintr-o tensiune continuă și una alternativă. În fig. 97 sînt reprezentate formele de undă ale tensiunilor și curenților din circuit, precum și a fluxului magnetic din miezul șocului. După cum se vede, fluxul are o valoare mare în porțiunea de perioadă pozitivă a tensiunii de alimentare compuse: de aceea în acest interval șocul fiind saturat se comportă ca un întrerupător închis și permite trecerea unui curent i_0 suficient de mare pentru aprinderea ignitronului. Cînd tensiunea rezultantă U devine mică și trece la valori negative, saturația dispare, șocul prezintă o reacțanță mare și curentul i_0 scade la o valoare foarte mică, astfel încît aprinderea pe electrod dispare. În acest circuit nu este necesară introducerea unui element redresor de protecție, deoarece se vede că tensiunea negativă este destul de mică.

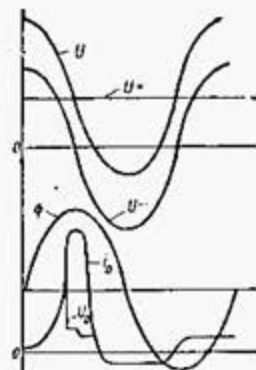


Fig. 97. — Curba tensiunii și curentului în circuitul de aprindere cu tensiune combinată continuă și alternativă.

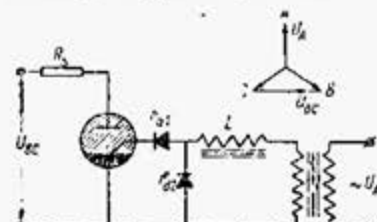


Fig. 98. — Circuit de aprindere independent cu șoc saturat și element redresor uscat.

În fig. 98 se arată schema de principiu a unui circuit independent de aprindere folosind o tensiune de alimentare sinusoidală, un șoc saturat și două elemente redresoare. În alternanța pozitivă a tensiunii de alimentare șocul L se saturează

la un moment dat și permite trecerea unui curent i_0 suficient de mare. Pentru ca momentul de aprindere să coincidă cu începutul alternanței pozitive a tensiunii de alimentare a ignitronului U_{BC} , este necesar să se defazeze tensiunea U_A care alimentează circuitul de aprindere față de tensiunea U_{BC} . Aceasta se obține ușor dacă una din tensiuni este o tensiune pe fază, iar cealaltă o tensiune între faze, așa cum arată diagrama vectorială din figură. Elementele redresoare r_{d1} și r_{d2} servesc ca elemente de protecție contra tensiunii in-

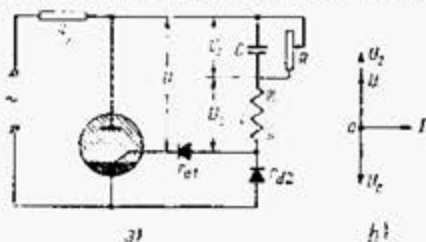


Fig. 99. — Circuit de aprindere ferorezonant.

verse, unul lucrând ca o rezistență în serie mare și celălalt ca o rezistență în paralel mică față de tensiunea negativă.

44. Circuit de aprindere ferorezonant. În fig. 99 este reprezentată schema de principiu a unui circuit de aprindere propriu, lucrând pe principiul ferorezonanței. Legătura dintre anodul ignitronului și electrodul de aprindere se realizează printr-un circuit-serie $L-C$ care prezintă o rezonanță parametrică. Inductanța cu miez feromagnetic are o valoare variabilă cu valoarea curentului care o traversează. La un moment dat, circuitul $L-C$ intră în rezonanță pe frecvența tensiunii de alimentare (50 Hz). Atunci tensiunea U de la capetele circuitului-serie devine foarte mică sau aproape nulă dacă circuitul este lipsit de rezistență, astfel încât

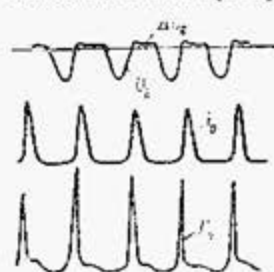


Fig. 101. — Forma de undă a curentului și tensiunii în circuitul de aprindere ferorezonant.

electrodul de aprindere primește o tensiune mare, care provoacă aprinderea. O explicație sumară a fenomenului de rezonanță parametrică se poate obține din diagramele din fig. 100 în care se arată variația tensiunilor U_L și U_C cu curentul I cum și a rezultantei lor, tensiunea U . Se vede că la o valoare particulară a curentului (I_0) cele două tensiuni ale condensatorului și inductanței sînt egale, de semne contrarii și tensiunea rezultantă U este nulă. Această diagramă ar fi valabilă însă numai în cazul unui regim de curenți staționari și sinusoidali, pentru care este valabilă diagrama vectorială dată în fig. 99. În cazul circuitului de aprindere, avem în realitate un regim tranzitoriu, iar forma curentului prin circuitul-serie este departe de a fi sinusoidală. În cuprinsul unei perioade a tensiunii aplicate există totuși un moment, cînd tensiunile la bornele condensatorului și inductanței sînt aproape

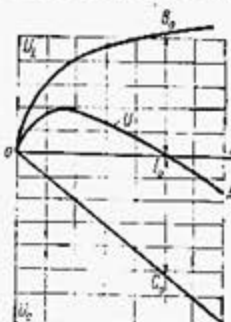


Fig. 100. — Variația tensiunilor cu curentul în circuitul ferorezonant.

unui unghi de aprindere al ignitronului mai mic. Reglarea acestui unghi se poate face cu ajutorul rezistenței variabile R pusă în paralel pe condensatorul C . Elementele redresoare r_{d1} și r_{d2} au același rol ca în schema precedentă.

45. Circuit de aprindere cu condensator. Curentul de încărcare și descărcare al unui condensator poate fi folosit pentru aprinderea ignitronului. Circuitele de aprindere construite pe acest principiu dau posibilitatea obținerii unui impuls ascuțit și cu o pantă mare a frontului de undă.

În fig. 102 este reprezentată schema de principiu a unui circuit de aprindere independent care folosește curentul de încărcare și descărcare al unui condensator. Funcționarea circuitului se produce astfel: la punerea în funcțiune a circuitului, condensatorul C fiind descărcat, apare ca un scurtcircuit față de rezistența R_1 .

Cînd tensiunea U_2 crește, se produce încărcarea condensatorului C printr-un curent care are forma unui impuls. Dacă se alege potrivit valoarea condensatorului C și a rezistenței R_2 vîrfurile acestui curent de încărcare poate fi suficient pentru aprinderea ignitronului. Curentul de încărcare al condensatorului scade însă repede și valoarea curentului i_0 prin electrodul de aprindere se reduce fiind limitată de data aceasta, pe lângă rezistența R_2 și de rezistența R_1 ; astfel aprinderea pe electrodul de aprindere durează foarte puțin. Cînd curentul i_0 s-a anulat, condensatorul C se descarcă pe rezistența R_1 și rămîne descărcat pînă la o nouă alternanță pozitivă a tensiunii U_2 .

Pentru a asigura un moment de aprindere potrivit cu începutul alternanței pozitive a tensiunii de alimentare U_1 este necesar să se defazeze tensiunea U_2 înaintea tensiunii U_1 , așa încît durata fenomenului tranzitoriu în care se desfășoară aprinderea ignitronului să aibă loc la începutul alternanței pozitive a tensiunii U_1 .

Cînd se cere să se realizeze un reglaj al curentului condus prin ignitron, printr-o întârziere reglabilă a aprinderii, este necesar să se modifice circuitul de mai sus adăugînd un tiratron cu comandă pe grilă. În fig. 103 este reprezentată schema de principiu a unui circuit de aprindere independent cu tiratron și condensator. În această schemă condensatorul C se încarcă în circuitul de redresare al elementului r_{d1} , curentul la începerea încărcării fiind limitat de rezistența R_1 . Condensatorul rămîne încărcat pînă în momentul cînd tiratronul primind un impuls de comandă pe grila sa, se aprinde, devine conducător și permite descărcarea condensatorului prin electrodul de aprindere. Rezistența R_2 limitează în acest caz curentul i_0 prin electrodul de aprindere și prin tiratron.

O variantă a circuitului de mai sus este arătată în fig. 104 în care în loc de un tiratron se folosește un tub cu gaz cu catod rece. Aprinderea tubului se face cu ajutorul unui impuls de tensiune dat de transformatorul T_1 producător de impulsuri. Cînd tubul se aprinde el permite trecerea curentului de încărcare al condensatorului C , care în stare de repaus este descărcat din cauza rezistenței R_1 . Rezistența R_2 limitează vîrfurile curentului pe electrodul de aprindere. Pe măsură ce condensatorul C se încarcă, tensiunea la bornele sale crește și tensiunea efectivă care rămîne la bornele tubului scade pînă cînd la un moment dat tubul se stinge și circuitul se întrerupe. Tensiunea sinusoidală care se aplică în primarul transformatorului T_1 se poate defaza față de tensiunea de alimentare a ignitronului și în modul acesta

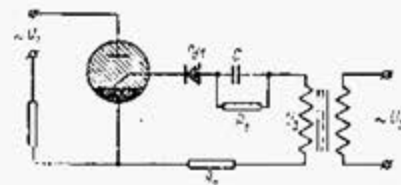


Fig. 102. — Circuit de aprindere independent cu condensator.

se poate obține un reglaj al momentului de aprindere și prin urmare al valorii eficace a curentului prin ignitron.

46. **Circuite de aprindere pentru ignitroane în redresoare polifazate.** Circuitele de aprindere folosite pentru ignitroanele redresoarelor polifazate se compun

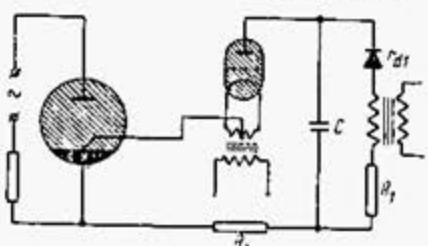


Fig. 103. — Circuit de aprindere independent cu tiratron și condensator.

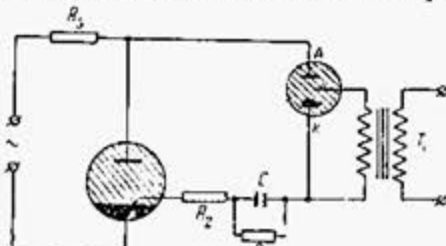


Fig. 104. — Circuit de aprindere propriu cu tub cu descărcare și condensator.

din circuitele simple arătate mai sus, reunite în sisteme polifazate. În fig. 105 se arată o schemă simplă de redresor trifazat cu ignitron, în care circuitele de aprindere sînt de tipul circuitului de aprindere propriu cu element redresor uscat: În locul elementelor redresoare uscate se pot folosi trei gazotroane, sau dacă se dorește un reglaj al tensiunii redresate, trei tiratroane comandate pe grilă. În fig. 106 se vede forma simplificată a circuitului în acest din urmă caz. Se folosește o comandă a tiratroanelor prin tensiune de negativare și tensiunea alternativă, de aceea se întrebuițează un redresor de negativare comun alimentat de transformatorul

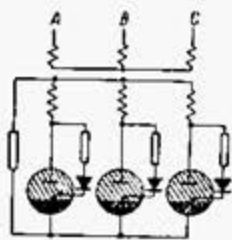


Fig. 105. — Schema pentru aprinderea ignitroanelor într-un circuit redresor trifazat mono-alternanță.

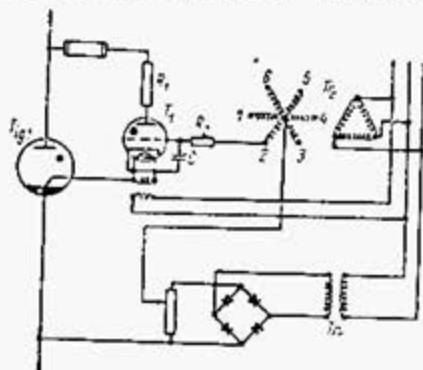


Fig. 106. — Circuit de aprindere propriu cu tiratroane la un redresor hexafazat.

Tr_n și un transformator de comandă Tr_c hexafazat, care alimentează 6 tiratroane de comandă pentru cele 6 ignitroane ale circuitului de redresare hexafazat. Se remarcă în schemă rezistențele de protecție R_1 și R_2 pentru curenții anodici și de grilă al tiratronului, cum și condensatorul C care mărește artificial capacitatea dintre grila și catodul tiratronului pentru a evita aprinderi necontrolate ale tiratronului, care s-ar produce în momentul aplicării tensiunii anodice a tiratronului, din cauza capacității interne dintre anodul și grila tiratronului.

În fig. 107 se arată circuitul de aprindere independent al unui redresor trifazat cu ignitroane. Acest circuit este alimentat de trei transformatoare monofazate de impuls. Pentru a obține un unghi de aprindere mic al ignitroanelor,

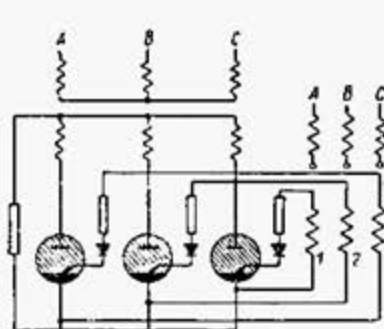


Fig. 107. — Circuit de aprindere independent la un redresor trifazat.

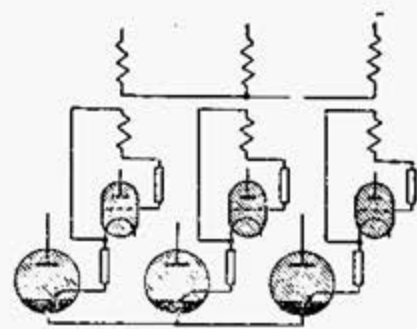


Fig. 108. — Circuit de aprindere independent cu tiratroane la un redresor trifazat.

înfășurările primare ale acestor transformatoare se leagă în triunghi și se alimentează de la aceeași rețea ca și transformatorul anodic al redresorului. Dacă se cere reglarea tensiunii redresate, se înlocuiesc cele trei elemente redresoare uscate prin trei tiratroane, așa cum se vede în fig. 108. Circuitul de grilă al acestor tiratroane este alimentat de un transformator trifazat, a cărui tensiune are o fază reglabilă.

În fig. 109 este reprezentat circuitul de aprindere independent pentru un redresor hexafazat cu ignitroane. Se folosește aici principiul comenzii de aprindere cu condensator, care oferă avantajul unui transformator de alimentare în circuitul de aprindere de putere mai mică, deoarece curentul propriu-zis de aprindere rezultă din energia acumulată în condensator. Momentul de declanșare a descărcării condensatorului se realizează prin comanda pe grilă a tiratronului dată de tensiunea de negativare reglabilă. În fig. 110 se dă o variantă a schemei de mai sus, pentru cazul unui redresor de putere mare, care folosește ignitron cu electrod de șuntare. În această schemă se folosesc șase transformatoare Tr_1 pentru alimentarea celor șase tiratroane de comandă, un transformator monofazat Tr_c pentru comanda pe grilă a tiratroanelor, șase transformatoare monofazate Tr_n pentru cele șase redresoare de negativare și un transformator hexafazat pentru alimentarea electrozilor de șuntare.

La instalațiile de putere mare se preferă uneori să se renunțe, din motive de economie, la utilizarea tiratroanelor în circuitele de aprindere și se folosesc circuite cu condensator și bobină saturată la care o comandă reglabilă se poate

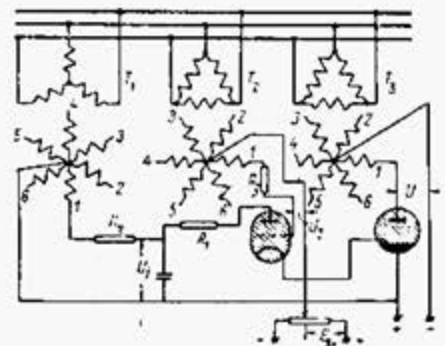


Fig. 109. — Circuit de aprindere independent cu tiratroane și condensator la un redresor hexafazat.

obține prin defazarea tensiunii de alimentare a circuitului de aprindere, cu ajutorul unui transductor (bobină saturată cu premagnetizare reglabilă). Un astfel de circuit este reprezentat în fig. 111. Pentru fiecare pereche de ignitroane, lucrând în contratimp (T_{ig1} și T_{ig2}) se folosește un singur circuit de aprindere. Condensatorul C se încarcă în mod alternativ la tensiunea dată de transformatorul trifazat Tr_c

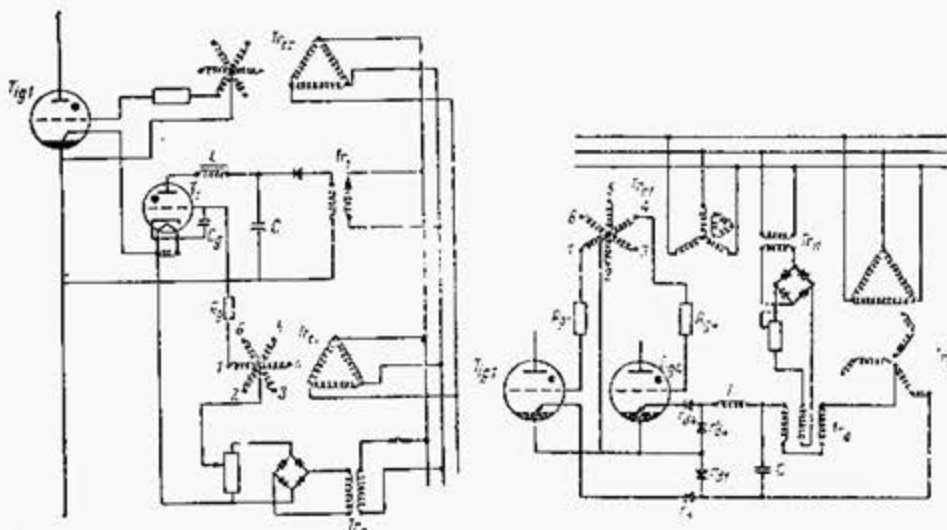


Fig. 110. — Circuit de aprindere independent cu tiratron și condensator la un redresor hexafazat folosind ignitroane cu electrod de șuntare.

Fig. 111. — Circuit de aprindere independent pentru redresor hexafazat cu șoc saturat și ignitroane cu electrod de șuntare.

care se poate defaza cu ajutorul transductorului Tr_d . Circuitul de magnetizare al transductorului este alimentat de un redresor cu elemente uscate în punte alimentat la rîndul său de transformatorul Tr_n . Acest circuit poate fi unic pentru cele trei transductoare din schemă, astfel încît reglînd tensiunea redresată, se reglează simultan curenții de premagnetizare din cele trei transductoare ale schemei. Inductanța saturată L permite descărcarea condensatorului C pe circuitul de aprindere numai cînd se depășește cîșul de saturare al miezului său magnetic. Pentru una din polaritățile de încărcare a condensatorului C curentul de descărcare trece prin L , elementul redresor r_{d1} , electrodul de aprindere al ignitronului T_{ig1} și elementul redresor r_{d1}' ; pentru cealaltă polaritate de încărcare a condensatorului C curentul de descărcare trece prin elementul redresor r_{d1} , electrodul de aprindere al ignitronului T_{ig1} , elementul redresor r_{d1}' și inductanța L .

Electrozii de șuntare ai ignitroanelor sînt alimentați de la transformatorul hexafazat Tr_c a cărui tensiune este defazată față de tensiunea transformatorului Tr_c cu unghiul necesar pentru ca electrozii de șuntare să intre în acțiune la timp și să oprească conducția pe electrozii de aprindere, după ce s-a produs conducția pe anozii ignitroanelor.

47. Circuite de aprindere pentru ignitroane, la un comutator sincron. În fig. 112 este reprezentat un circuit de aprindere propriu. Electrocul de aprindere

este legat la anodul ignitronului printr-un tiratron. Cînd tensiunea anodică este pozitivă, tiratronul se poate aprinde dacă primește un impuls de comandă pe grila sa. Atunci electrodul de aprindere este legat la sursa de curent alternativ în serie cu sarcina (primarul transformatorului de sudură) și prin el poate trece un curent. Se vede că mărimea acestui curent depinde de sarcina din circuitul comuta-

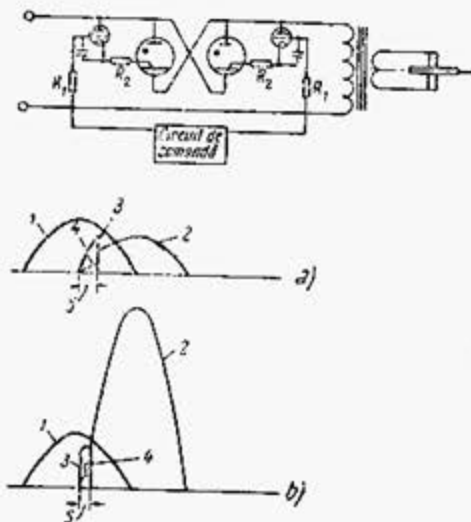


Fig. 112. — Formele de undă a tensiunii și curentului la un comutator sincron. Influența impedanței de sarcină asupra unghiului de aprindere (α_{ig}):

1 — tensiunea de alimentare; 2 — curentul anodic; 3 — tensiunea pe electrodul de aprindere; 4 — curentul prin electrodul de aprindere; 5 — durata curentului prin electrodul de aprindere.

torului sincron. După cum arată diagrama din fig. 112a, curentul de sarcină este decalat în urma tensiunii de alimentare.

Din cauza inductanței din circuit, tensiunea și curentul electrodului de aprindere sînt nule la momentul inițial. Viteza de creștere a curentului este determinată de inductanța sarcinii, astfel încît intervalul de timp pînă la momentul aprinderii ignitronului depinde nu numai de caracteristicile electrodului de aprindere dar și de constantele circuitului de sarcină. Comparînd diagrama a cu diagrama b din fig. 112, se vede efectul impedanței de sarcină asupra unghiului de aprindere al ignitronului α_{ig} .

În fig. 113 este reprezentată o diagramă care permite calculul unghiului de aprindere α_{ig} pentru un caz particular al circuitului de sarcină și al unghiului de comandă:

- tensiunea de alimentare 220 V;
- curent de sarcină 40 A;
- factor de putere 0,25;
- unghi de comandă 120° ;
- rezistența în serie cu electrodul de aprindere 1 Ω .

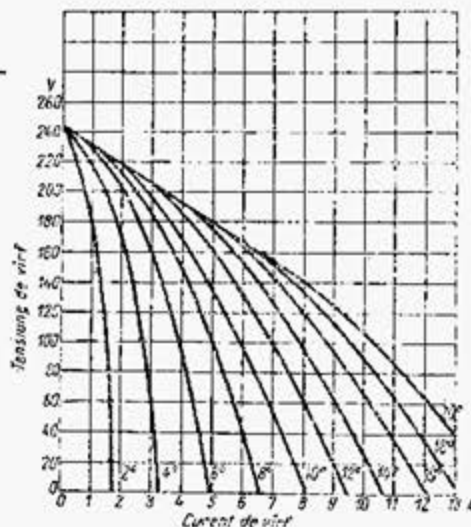


Fig. 113. — Diagrama pentru determinarea unghiului de aprindere al electrodului de aprindere, pentru un caz particular.

Unghiul de aprindere α_{ig} este indicat pe fiecare curbă. Dacă un electrod de aprindere al igratronului are de exemplu o tensiune de vîrf de 100 V și un curent de vîrf de 10 A necesare pentru aprindere, se deduce din diagramă că unghiul α_{ig} este ceva mai mare de 18° .

TEORIA REDRESĂRII

G. Redresoare monofazate

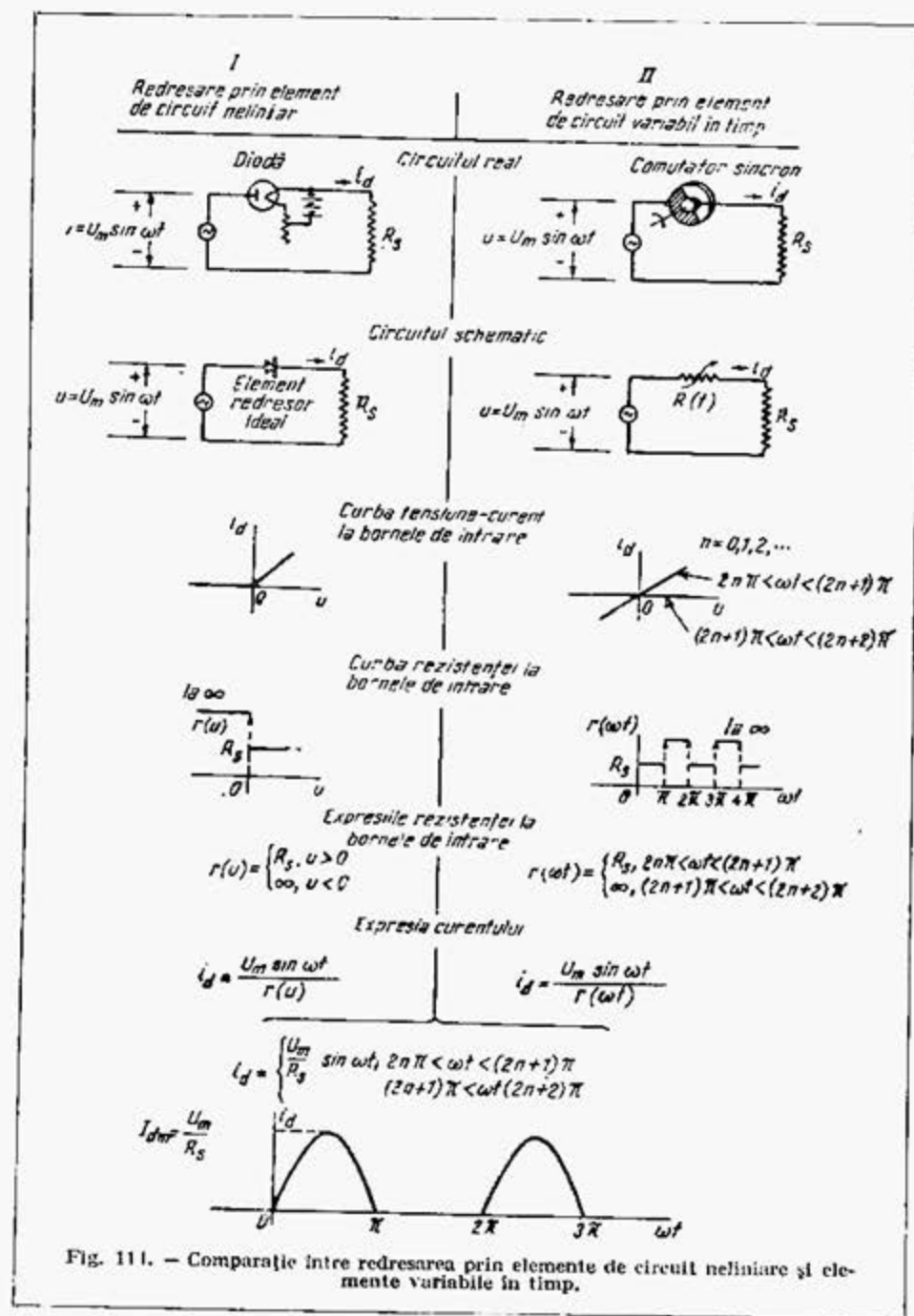
48. **Generalități.** Analiza circuitelor redresoare care se va da mai departe se aplică nu numai circuitelor care conțin tuburi electronice și ionice (kenotroane, gazotroane, tiratroane și tuburi cu bale de mercur), dar și circuitelor care conțin orice alte dispozitive, care, deși din punct de vedere fizic sînt deosebite, prezintă același caracter de neliniaritate sau conducție unilaterală (de exemplu redresoarele cu strat de baraj, cristalul detector de galenă și anumite celule electrolitice).

Pentru a nu limita discuția la un anumit fel de dispozitive, se va da un sens general cuvîntului de *element redresor*, care se definește astfel: este un dispozitiv care transformă curentul alternativ în curent unidirecțional în baza unei caracteristici, care permite o curgere apreciazabilă de curent numai într-o singură direcție. O analogie mecanică se găsește în supapa unei pompe cu mișcare alternativă care permite curgerea lichidului într-o singură direcție și oprește curgerea în direcția opusă.

49. **Principiul redresării.** Redresarea sau transformarea curentului alternativ în curent continuu este efectuată de obicei prin dispozitive care conduc curentul mai ușor într-o direcție decît în alta, dar se poate realiza și prin alte mijloace. De exemplu elementele de circuit variabile în timp, cum sînt comutatoarele sincronice și contactele acționate de armături vibrante, pot fi făcute să-și varieze rezistența lor în sincronism, cu variațiile tensiunii unei surse și astfel să se producă un curent unidirecțional. Mașinile rotative, convertizoarele sincronice și grupurile motor-generator pot de asemenea să fie utilizate la producerea curentului continuu din curent alternativ, însă atunci procesul nu mai este un proces de redresare.

α) **Comparatie între elementele neliniare și cele variabile.** În fig. 114, o expunere paralelă a redresării obținute printr-un element neliniar și un element variabil în timp arată asemănările și deosebirile între cele două metode de obținere a unui curent continuu sau curent redresat. Coloana I-a din figură se poate considera ca reprezentînd un redresor simplu de tipul kenotronului, cum se poate utiliza de exemplu pentru alimentarea de tensiune înaltă a unui emițător radio. Rezistența kenotronului se poate considera neglijabilă în starea de conducție. Coloana a II-a poate reprezenta un redresor cu întreruptor sincron, cum se întrebuințează adesea pentru încărcarea bateriilor de acumuloare. Redresoarele mecanice sau cu contacte, care lucrează pe principiul elementelor variabile în timp, ar putea avea posibilități egale sau mai mari decît redresoarele cu tuburi electronice sau ionice. Astfel de redresoare au început să capete utilizare în aplicațiile industriale, dar n-au atins încă grad de dezvoltare ca celelalte redresoare.

Fig. 114 arată că perioada tensiunii alternative a sursei poate fi împărțită în două: o parte în care elementul redresor conduce curentul, și alta în care elementul nu conduce. Dacă se întrebuințează un element variabil în timp, durata perioadei de conducție și a perioadei de neconducție nu depinde de restul circuitului. Pe de altă parte, dacă se folosește un element neliniar, duratele perioadelor de conducție și neconducție depind de celelalte elemente din circuit. Pentru a înțelege această



deosebire esențială în comportarea elementelor redresoare din cele două tipuri, să presupunem că s-a intercalat o baterie în serie cu rezistența R în fiecare din circuitele arătate în fig. 114. Bateria nu va avea nici un efect asupra perioadei de conducție a comutatorului sincron, deoarece timpul său de conducție depinde numai de viteza motorului de antrenare și de lungimea segmentului de contact. Bateria însă va face ca dioda să conducă curentul un timp mai lung sau mai scurt după polaritatea sa, pentru că tensiunea sa se adaugă la tensiunea sursei și modifică intervalul de timp în care tensiunea totală aplicată diodei este pozitivă. Această

dependență a elementului redresor de tip nelinier de condițiile circuitului și ale elementului redresor de tip variabil numai de timp este fundamentală pentru distincția dintre un element nelinier și un element variabil în timp.

În acest paragraf se vor considera numai circuite redresoare folosind elemente neliniare.

β) *Elemente redresoare idealizate.* Din cauza acestei dificultăți, în dezvoltarea analizei trebuie făcute ipoteze simplificatoare chiar și în cazul celor mai elementare circuite pentru ca rezultatele calculului să fie practic utilizabile.

Elementele redresoare utilizate în practică se pot împărți în două grupe, după forma generală a caracteristicilor lor și anume:

- **grupul 1:** redresoare, ca dioda termoionică cu vid înaintat (kenotronul) și elementul redresor cu strat de baraj, a căror caracteristică tensiune-curent, în sensul de conducție, se poate aproxima printr-o linie dreaptă trecând prin origine;
- **grupul 2:** redresoare, ca dioda cu arc de mercur și dioda termoionică cu gaz (gazotronul) a căror curbă caracteristică tensiune-curent în sensul de conducție, se poate aproxima cu o linie verticală.

În fig. 115 se arată formele reale și idealizate ale caracteristicilor tensiune-curent pentru fiecare din aceste grupe.

Caracteristica tensiune-curent a redresorului ideal arătat în partea a III-a a fig. 115 s-a obținut dintr-o simplificare dusă mai departe a caracteristicilor celor două grupe de elemente redresoare. Căderea de tensiune pe un element redresor ideal este neglijabilă în starea de conducție, adică caracteristica tensiune-curent a elementului redresor din grupul 1 se presupune că are o pantă atât de mare în regiunea de conducție, încât coincide practic cu axa i_a , sau curba elementului redresor din grupul 2 se presupune deplasată față de axa i_a cu o distanță atât de mică încât practic coincide cu această axă. Din aceste motive, elementul redresor ideal poate fi închipuit ca un întrerupător care este închis și are rezistența nulă dacă curentul curge în direcția normală și este deschis și întrerupe total curentul, dacă din cauza inversării polarității tensiunii, curentul tinde să treacă în direcție opusă. Elementele

redresoare reale pot fi înlocuite printr-un element redresor ideal în analiza circuitelor redresoare, dacă dorim să scoatem în evidență numai caracteristicile principale ale acestor circuite. Din cauză că într-un element redresor ideal nu există consum de putere, este evident că aproximația făcută nu este suficientă, dacă trebuie găsită încălzirea elementului redresor, randamentul circuitului și căderea de tensiune pe elementul redresor.

După cum se arată în fig. 115, elementul redresor din grupul 1 poate fi reprezentat cu aproximație ca un element ideal în serie cu o rezistență R_i , deoarece curba tensiune-curent a unei astfel de combinații este identică cu curba idealizată pentru redresoarele din grupul 1, dacă rezistența R_i se alege egală cu inversul pantei curbei tensiune-curent în regiunea de conducție. În același mod, elementul redresor din grupul 2 se poate reprezenta cu aproximație printr-o pilă în serie cu un element redresor ideal, ca în figură. Tensiunea pilei este U_0 (egală cu deplasarea curbei idealizate față de axa i_a) și polaritatea pilei se alege astfel, încât tensiunea ei să se opună curgerii curentului în direcția de conducție, analog cu efectul căderii de tensiune pe tub. Când o diodă cu vid înaintat se reprezintă printr-o caracteristică idealizată, o aproximație mai bună decât caracteristica idealizată din grupul 1 se obține adesea considerând dioda ca o combinație serie formată dintr-un element redresor ideal, o pilă de tensiune U_0 și o rezistență R_i . Caracteristica ce rezultă este o combinație a caracteristicilor idealizate pentru elemente redresoare din grupul 1 și grupul 2; printr-o potrivire a mărimilor U_0 și R_i se poate aproxima destul de bine caracteristica reală a diodei.

γ) *Sursă ideală.* O altă simplificare care se poate face privește sursa de curent alternativ care, în majoritatea cazurilor, este legată la redresor printr-un transformator ridicător sau coborîtor de tensiune. Luarea în considerare a impedanței de scurtcircuit a acestui transformator și a impedanței interne a sursei este necesară pentru o soluție completă a problemei, mai cu seamă în analiza funcționării redresoarelor de mare putere, dar introducerea acestor elemente în calcule complică foarte mult dezvoltarea lor. În examinarea circuitului redresor monofazat din acest paragraf, transformatorul se va considera ideal, adică cu o impedanță de scurtcircuit nulă, iar sursa se va presupune cu o impedanță internă nulă și cu o tensiune la borne sinusoidală. În modul acesta se aplică circuitului redresor o tensiune sinusoidală de amplitudine constantă, independentă de valoarea sarcinii, așa cum se arată în fig. 116. La circuitele redresoare polifazate care se vor examina în subcapitolul I, se va lua în considerare impedanța transformatorului. În fig. 116 se arată conexiunile transformatorului potrivite pentru circuite redresoare mono-alternanță și dublă-alternanță. Transformatorul pentru circuitul mono-alternanță furnizează o singură tensiune sinusoidală u , iar cel pentru circuitul dublă-alternanță furnizează două tensiuni sinusoidale u și u' decalate cu 180° . În figură sînt indicate polaritățile pozitive convenționale.

δ) *Ondulația și filtrul de netezire.* Un redresor funcționînd cu o sarcină pur rezistivă ca în fig. 114 produce un curent, care, deși este unidirecțional, nu este constant sau neted, ci are forma unor pulsuri astfel cum se arată în fig. 111. Într-un număr limitat de cazuri practice, un asemenea curent unidirecțional pulsatoriu poate fi satisfăcător. În multe aplicații însă, se cere un curent care să fie practic constant; pentru aceasta se folosesc circuite de filtraj speciale care netezesc curentul. Fig. 117 reprezintă schema completă a unui redresor dublă-alternanță, utilizat adesea pentru a furniza curent continuu la 200–1.000 V în aparatele de radio. Filtrul poate fi o simplă inductanță în serie, sau un condensator în paralel, sau un cuadripol mai complicat compus din inductanțe și condensatoare. Condensatorul în paralel tinde să mențină tensiunea la bornele sale constantă, iar inductanța serie

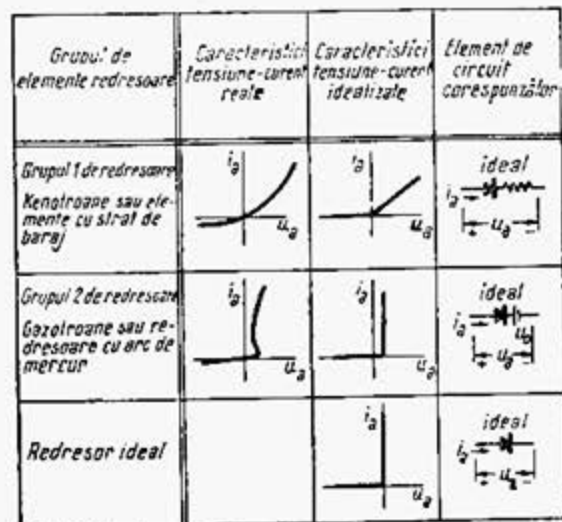


Fig. 115. — Caracteristicile elementelor redresoare din grupul 1, grupul 2 și ideale.

tinde să mențină constant curentul prin ea. În ansamblu, aceste elemente tind să evite variațiile de curent sau de tensiune la bornele de ieșire ale redresorului.

Circuit real

Circuit ideal

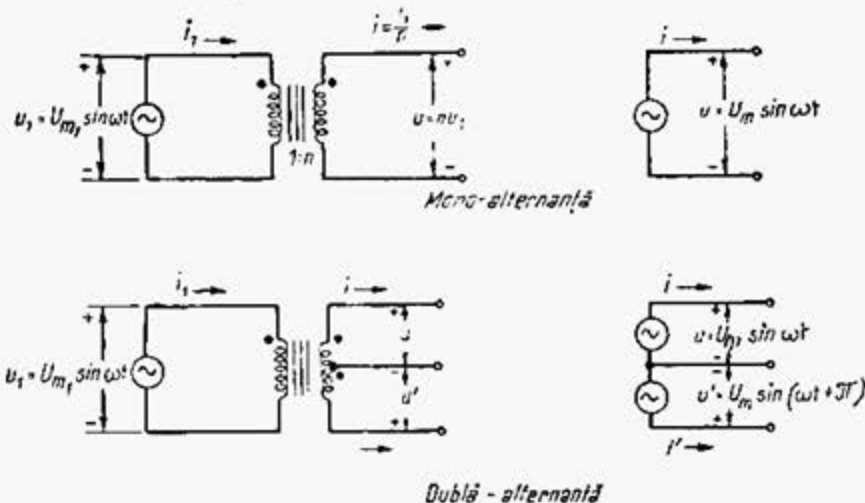


Fig. 116. - Sursă și transformator de alimentare idealizate, pentru redresoarele mono și dublă-alternanță.

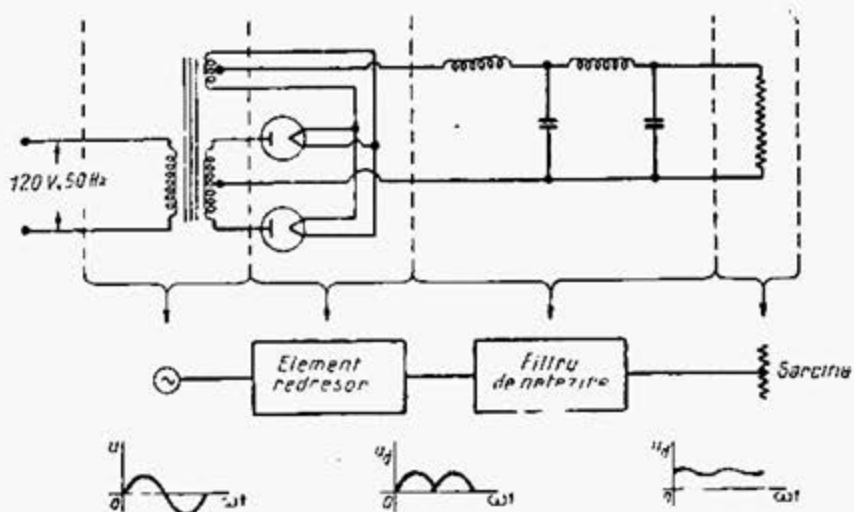


Fig. 117. - Redresor dublă-alternanță cu filtru.

Alegerea elementului într-un filtru depinde de structura filtrului și de gradul în care pulsațiile curentului trebuie netezite.

a) Redresoare cu sarcină rezistivă

50. Redresoare cu diode termionice cu vid înaintat (kenotroane).
a) Caracteristicile principale ale unui circuit redresor. Circuitele redresoare mono-alternanță și dublă-alternanță sînt foarte des utilizate. În acest paragraf se vor folosi ipotezele simplificatoare arătate mai înainte pentru a determina performanța elementelor redresoare din grupul 1, cînd se utilizează în astfel de circuite.

Se presupune că redresorul debitează puterea unei sarcini rezistive, direct, fără intermediul unui filtru de netezire. Modificările aduse de utilizarea unui filtru vor fi examinate în paragrafele următoare.

La un circuit redresor trebuie să se cunoască următoarele caracteristici principale:

- forma de undă a curentului debitat în sarcină;
- variația tensiunii redresate, cu sarcina;
- randamentul redresorului;
- încălzirea elementelor redresoare;
- valoarea de vîrf a curentului în elementele redresoare.

Este de așteptat că aceste caracteristici, astfel cum se vor determina în paragrafele următoare, vor diferi în oarecare măsură față de acelea care se pot obține prin măsurători, deoarece analiza se face în baza unor ipoteze simplificatoare. În afară de aceasta, cînd se cere să se găsească randamentul global real, este necesar să se ia în considerare toate pierderile deci și pierderea de putere în transformator și puterea necesară încălzirii filamentelor tuburilor redresoare sau puterea necesară funcționării pompelor de vid, dacă se folosește un mutator cu mercur în recipient metalic. Toate aceste pierderi se vor lăsa de o parte în analiza care urmează.

β) Circuite mono-alternanță. Circuitul redresor mono-alternanță cu sarcină rezistivă și fără pierderi este arătat în fig. 118. Conexiunile reale folosite într-un astfel de redresor se arată în fig. 118a, cu excepția că legăturile pentru încălzirea catodului nu sînt arătate.

În fig. 118b este reprezentat circuitul idealizat. În acest circuit elementul redresor este reprezentat ca un element ideal în serie cu o rezistență R_1 . Rezistența de sarcină este notată cu R_s , tensiunea de alimentare este:

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (50,1)$$

iar curentul de sarcină redresat se notează cu i_d .

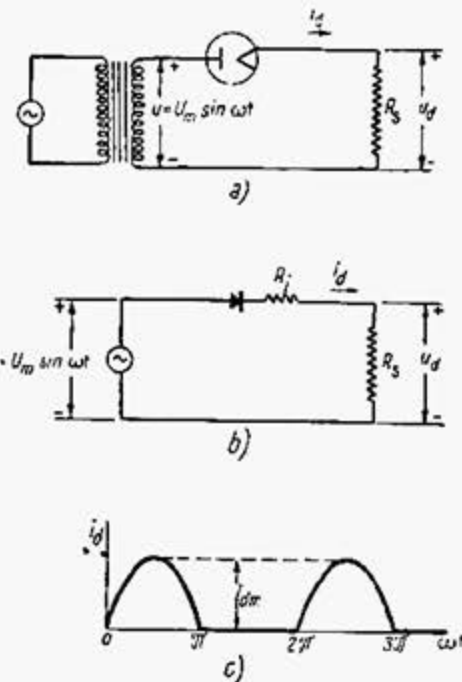


Fig. 118. - Redresor mono-alternanță cu element din grupul 1 (diodă cu vid înaintat) și sarcină rezistivă.

Cu excepția elementului redresor ideal care se comportă ca un întreruptor influențat de sensul în care curentul tinde să curgă, toate celelalte elemente ale circuitului idealizat sînt liniare.

Curentul redresat. Forma de undă a curentului este cea arătată în fig. 118c și se compune dintr-o succesiune de jumătăți de sinusoidă a căror valoare maximă sau valoare de vîrf este:

$$I_{dm} = \frac{U_m}{R_i + R_s} \quad (50.2)$$

Între perioadele de conducție se intercalează perioadele de neconducție. Tensiunea la bornele sarcinii este:

$$U_d = R_s i_d \quad (50.3)$$

deci are aceeași formă de undă ca și curentul.

Dacă se dezvoltă curentul în serie Fourier se găsește:

$$i_d = I_{dm} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right) \quad (50.4)$$

dacă se alege originea de timp pentru unda de curent și de tensiune astfel încît unda de tensiune să aibă expresia dată de relația (50.1). Această dezvoltare în serie a curentului se poate considera ca fiind compusă dintr-o sumă infinită de componente de curent. Primul termen al seriei este componenta de curent continuu sau componenta medie a curentului redresat:

$$I_d = \frac{I_{dm}}{\pi} \quad (50.5)$$

Al doilea termen este componenta fundamentală (sau armonica 1) de frecvență egală cu frecvența sursei și are valoarea maximă:

$$\sqrt{2} I_1 = \frac{1}{2} I_{dm} \quad (50.6)$$

în care I_1 este valoarea eficace a componentei fundamentale. În mod analog termenul al treilea este armonica a 2-a a cărei valoare eficace este I_2 , iar valoarea maximă:

$$\sqrt{2} I_2 = \frac{2}{3\pi} I_{dm} \quad (50.7)$$

și așa mai departe.

Se observă că frecvența cea mai mică a componentelor de curent este egală cu frecvența sursei de alimentare.

Valoarea eficace a curentului de sarcină sau a curentului redresat, notată cu I_{de} se obține din expresia:

$$I_{de} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_d^2(\omega t) d(\omega t)} = \sqrt{\frac{I_{dm}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t d(\omega t)} \quad (50.8)$$

din care rezultă:

$$I_{de} = \frac{1}{2} I_{dm} \quad (50.9)$$

Tensiunea redresată. Componentele tensiunii la bornele sarcinii se pot găsi în același mod, folosind relațiile (50.2) și (50.3). Aceste componente se pot găsi direct din componentele de curent corespunzătoare. Valoarea maximă, valoarea medie și valoarea eficace a acestor tensiuni sînt, prin urmare:

$$U_{dm} = U_m \frac{R_s}{R_i + R_s} = \frac{U_m}{1 + \frac{R_i}{R_s}} \quad (50.10)$$

$$U_d = \frac{U_m}{\pi \left(1 + \frac{R_i}{R_s} \right)} \quad (50.11)$$

$$U_{de} = \frac{U_m}{2 \left(1 + \frac{R_i}{R_s} \right)} \quad (50.12)$$

Examinînd relația (50.11) se observă că, afară de cazul cînd rezistența de sarcină este mare față de rezistența elementului redresor, reglajul în tensiune al acestui circuit poate fi defectuos, adică variația tensiunii redresate cu sarcina poate fi mare. Valoarea maximă a tensiunii redresate se produce cînd R_s este

foarte mare în comparație cu R_i și este egală cu $\frac{U_m}{\pi}$.

Puterea dezvoltată în rezistența de sarcină de către componenta de curent continuu I_d , denumită puterea de curent continuu, este:

$$P_d = R_s I_d^2 = \frac{U_m^2 R_s}{\pi^2 (R_i + R_s)^2} \quad (50.13)$$

Această putere nu este toată puterea care produce încălzirea rezistenței, deoarece la această încălzire trebuie să se considere toate componentele curentului redresat. Scopul redresării nu este însă încălzirea rezistenței de sarcină. Din acest motiv se consideră putere utilă numai puterea exprimată de relația (50.13).

Pentru o rezistență R_i dată și o rezistență de sarcină R_s dată, puterea debitată poate fi variată numai dacă se variază tensiunea aplicată u . În anumite aplicații se poate prevedea posibilitatea unei astfel de variații. În acest scop se folosește un transformator cu priză, un regulator de inducție, sau alte scheme similare.

Deoarece elementul redresor real este reprezentat aci printr-un element redresor ideal, în serie cu o rezistență liniară R_i , puterea disipată în element este suma puterii consumate de elementul redresor ideal și de rezistența serie. În elementul redresor ideal nu sînt însă pierderi de putere; prin urmare, deoarece R_i este o rezistență liniară, puterea disipată în elementul redresor sub formă de căldură este:

$$P_p = R_i I_{de}^2 = \frac{U_m^2 R_i}{4 (R_i + R_s)^2} \quad (50.14)$$

Trebuie menționat că această relație a puterii pierdute în elementul redresor se poate utiliza numai pentru că rezistența R_i s-a presupus liniară. Temperatura care se dezvoltă în tubul redresor sau în oricare alt element de redresare este un factor principal în determinarea puterii nominale a redresorului, cum de altfel se întâmplă în toate celelalte forme de aparate electrice.

Puterea totală absorbită de la sursă trebuie să fie egală cu puterea totală disipată în circuitul redresor și expresia ei este:

$$P_{in} = (R_i + R_s) I_{de}^2 = \frac{U_m^2}{4 (R_i + R_s)} \quad (50.15)$$

Randamentul. Din relațiile (50.13) și (50.15) se obține randamentul redresării:

$$\eta_{red} = \frac{P_d}{P_{in}} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_s}} = \frac{40,6}{1 + \frac{R_i}{R_s}} [\%]. \quad (50.16)$$

În fig. 119 este reprezentată variația randamentului redresării în funcție de raportul $\frac{R_s}{R_i}$. Randamentul se apropie de un maxim teoretic de 40,6%, în acest redresor idealizat cînd R_s devine mare în raport cu R_i . Randamentul

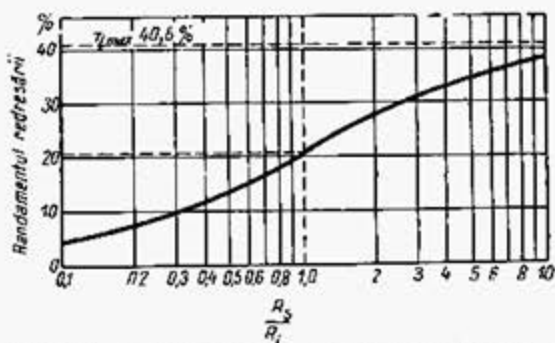


Fig. 119. — Randamentul redresării în funcție de raportul R_s/R_i , pentru un redresor mono-alternanță cu element din grupul 1 (diodă cu vid înalt).

este dat de componentele alternative ale curentului redresat. Factorul $\left(\frac{2}{\pi}\right)^2$ din relația (50.16) ține seamă de această a doua pierdere din circuit.

Factorul de ondulație. Deoarece atât curentul furnizat sarcinii, cât și tensiunea dezvoltată la bornele ei au forma unor jumătăți de sinusoidă arătate în fig. 118c și reprezentată de seria Fourier (50.4) se vede că scopul ultim al redresorului, anume acela de a produce o tensiune continuă și un curent continuu de la o sursă de tensiune sinusoidală este atins în mod imperfect. Măsura în care tensiunea

este mai mic decît 100% din două motive:

— numai o parte din puterea dată de sursă circuitului redresor se găsește în rezistența de sarcină, restul se pierde sub formă de căldură în elementul redresor. Factorul

$$\frac{1}{1 + \left(\frac{R_i}{R_s}\right)} \text{ din relația (50.16)}$$

ține seamă de aceste pierderi din elementul redresor;

— numai o parte din puterea debitată sarcinii este putere utilă sau de curent continuu; restul, care se pierde inutil sub formă de căldură,

și curentul se îndepărtează de la forma continuă dorită se reprezintă prin **factorul de ondulație** care se definește astfel:

$$\gamma = \frac{\text{Valoarea eficace a componentelor alternative ale tensiunii (sau ale curentului)}}{\text{Valoarea medie a tensiunii (sau a curentului)}}. \quad (50.17)$$

Această definiție poate fi dată într-o formă mai convenabilă pentru analiză, dacă se observă că valoarea eficace a unei unde compuse din mai multe armonice este rădăcina pătrată a sumei pătratelor valorilor eficace ale diferitelor componente. Astfel, deoarece componenta continuă este o componentă armonică de frecvență nulă, factorul de ondulație al curentului se exprimă:

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_{de}^2 - I_d^2}}{I_d} = \sqrt{\left(\frac{I_{de}}{I_d}\right)^2 - 1}. \quad (50.18)$$

Pentru curentul redresat în semiundă raportul $\frac{I_{de}}{I_d}$ se numește **factor de formă**¹⁾ al unde și se notează cu F :

$$F = \frac{I_{de}}{I_d}. \quad (50.19)$$

Factorul de formă poate fi măsurat ușor cu două ampermetre, unul fiind un ampermetru de curent continuu și celălalt un ampermetru de curent alternativ, astfel construit, încît să indice corect valoarea eficace a unui curent nesinusoidal.

Factorul de ondulație se poate exprima în funcție de factorul de formă:

$$\gamma = \sqrt{F^2 - 1}. \quad (50.20)$$

Pentru cazul de față al redresorului mono-alternanță cu sarcină rezistivă și fără filtru:

$$F = \frac{I_{de}}{I_d} = \frac{I_{dm}/2}{I_{dm}/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57 \quad (50.21)$$

$$\gamma = \sqrt{(1,57)^2 - 1} = 1,21. \quad (50.22)$$

γ) **Circuit dublă-alternanță.** O formă de unde mai netedă se poate obține dacă în locul circuitului din fig. 118 se folosește un circuit care să redreseze ambele alternanțe ale tensiunii de alimentare. Aceasta se realizează într-un circuit de redresare dublă-alternanță. Marea majoritate a redresoarelor monofazate folosesc o astfel de conexiune (de obicei în combinație cu un circuit sau filtru de netezire). În fig. 120 se arată schema de principiu a unui redresor dublă-alternanță cu sarcină rezistivă fără filtru. Se folosește o priză mediană pe secundarul transformatorului de alimentare, pentru a se obține la borne două tensiuni sinusoidale u și u' egale în mărime și defazate între ele cu 180° . În figură se arată sensurile pozitive convenționale alese pentru aceste tensiuni, astfel încît expresiile lor analitice sînt:

$$u = U_m \sin \omega t; \quad (50.23)$$

$$u' = -u; \quad (50.24)$$

$$u' = U_m \sin (\omega t + \pi). \quad (50.25)$$

¹⁾ Să nu se confunde cu factorul de formă definit la curenții alternativi.

Pentru a analiza circuitul, se vor folosi sursele idealizate arătate în fig. 120b și 120c care au caracteristicile arătate în fig. 116. Cele două elemente redresoare se presupun că au caracteristici identice, presupunere foarte bine justificată în practică.

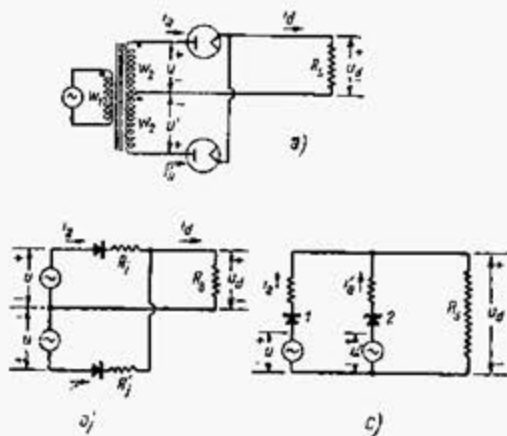


Fig. 120. — Redresor dublă-alternanță cu elemente din grupul 1 (diode cu vid înaintat) și sarcină rezistivă.

Curentul redresat. În timpul unei jumătăți de perioadă, tensiunea pe redresorul 1 are polaritatea corespunzătoare sensului de conducție; astfel acest redresor conduce curentul, pe când redresorul 2 nu conduce. În timpul jumătății de perioadă următoare, condițiile se inversează și redresorul 2 conduce curentul, pe când redresorul 1 nu conduce. Atât curentul i_a prin redresorul 1, cât și curentul i'_a prin redresorul 2 au aceeași formă de undă ca în conexiunea mono-alternanță, însă cele două forme de undă ale curenților sînt defazate între ele cu 180° . Ambii curenți curg prin rezistența de sarcină R_s în același sens, astfel încît curentul rezultat este:

$$i_d = i_a + i'_a, \quad (50.26)$$

și forma lui este reprezentată în fig. 121. Curenții prin cele două elemente redresoare au forma de undă de la redresorul mono-alternanță, reprezentată în fig. 118c. Curentul în sarcină se poate deci găsi, luînd suma lor:

$$i_a = I_{dm} \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right); \quad (50.27)$$

$$i'_a = i_a(\omega t + \pi) =$$

$$= I_{dm} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right); \quad (50.28)$$

$$i_d = i_a + i'_a =$$

$$= I_{dm} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos \omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right). \quad (50.29)$$

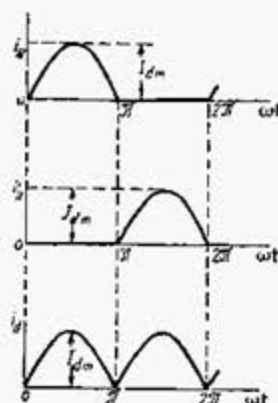


Fig. 121. — Formele de undă ale curenților din circuitul redresor dublă-alternanță cu elemente din grupul 1, sarcină rezistivă, fără filtru.

Metoda folosită în relațiile (50.27), (50.28) și (50.29) pentru a găsi dezvoltarea în serie Fourier a formei de undă a curentului redresat în conexiunea dublă-alternanță, prin însumarea seriilor Fourier pe care le-am avut dinainte este o metodă foarte utilizată. Adesea, în loc de a dezvolta în serie Fourier o undă complicată prin metoda obișnuită, se pot combina una sau mai multe serii cunoscute ale formelor de undă componente pentru a obține seria Fourier dorită pentru undă compusă, pe o cale mult mai ușoară. În exemplul de mai sus, coeficienții seriei Fourier s-ar fi putut obține direct prin metoda cunoscută în analiza Fourier, însă este mult mai expeditiv să se obțină curentul i'_a adăugînd o defazare de unghi de 180° la expresia curentului i_a și apoi adunînd curenții i_a și i'_a .

Din relația (50.29) se vede că frecvența cea mai mică a ondulației curentului redresat este 2ω , adică este dublul frecvenței tensiunii de alimentare, deci frecvența minimă a curentului redresat în sarcină este de două ori mai mare decît în cazul conexiunii mono-alternanță. Acest fapt reprezintă un avantaj incontestabil în ceea ce privește netezirea curentului într-un filtru care s-ar utiliza pentru netezire, care se poate face în acest caz cu elemente de circuit mai mici. Este interesant de observat că adunarea celor doi curenți i_a și i'_a , fiecare avînd un termen în $\sin \omega t$, dă naștere unui curent în care acest termen lipsește, dar care conține toți ceilalți termeni din i_a și i'_a .

Curentul absorbit. Din cauza sensurilor relative ale bobinajelor și curenților, cei doi curenți i_a și i'_a din fig. 116 și 120 tind să magnetizeze miezul transformatorului în sensuri opuse. Componenta de sarcină a curentului în bobinajul primar este deci:

$$i_1 = \frac{w_2}{w_1} (i_a - i'_a), \quad (50.30)$$

în care i_1 este curentul primar; w_1 este numărul de spire ale bobinajului primar; w_2 este numărul de spire ale bobinajului secundar socotit între priza mediană și una din borne.

Adunarea grafică a curenților i_a și $-i'_a$, asemănătoare cu adunarea acestor curenți efectuată în fig. 121 sau adunarea seriilor din expresiile (50.27) și (50.28) ne conduce la:

$$i_1 = \frac{w_2}{w_1} I_{dm} \sin \omega t. \quad (50.31)$$

Se vede că circuitul redresor dublă-alternanță absoarbe un curent sinusoidal de la rețea, deși curentul redresat i_d și curenții secundari i_a și i'_a sînt foarte mult diferiți de forma sinusoidală. Din acest fapt rezultă două avantaje importante: 1) pierderile în transformator sînt mici în comparație cu acelea ale circuitului mono-alternanță, deoarece componenta de sarcină a curentului primar este sinusoidală și pentru că nu există un curent continuu de magnetizare a miezului care să producă un curent de excitație exagerat de mare; în consecință se poate utiliza un transformator mic; 2) tendința de a produce interferențe inductive cu eventuale circuite de comunicație învecinate este mică.

Valorile maximă, medie și eficace ale curentului în sarcină sînt:

$$I_{dm} = \frac{U_m}{R_t + R_s}; \quad (50.32)$$

$$I_d = \frac{2}{\pi} I_{dm}; \quad (50.33) \quad I_{dc} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{dm}. \quad (50.34)$$

în care: U_m este valoarea maximă a tensiunii pe o jumătate a secundarului transformatorului sau tensiunea care lucrează în serie cu un element redresor și rezistența de sarcină;

R_i — rezistența unui element redresor.

Valorile maximă, medie și eficace ale tensiunii redresate sînt:

$$U_{dm} = \frac{U_m}{1 + \frac{R_i}{R_s}}; \quad (50.35)$$

$$U_d = \frac{2}{\pi} \frac{U_m}{1 + \frac{R_i}{R_s}}; \quad (50.36)$$

$$U_{de} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{U_m}{1 + \frac{R_i}{R_s}}. \quad (50.37)$$

Puterea de curent continuu dezvoltată în sarcină este:

$$P_d = R_s I_d^2 = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{U_m^2 R_s}{(R_i + R_s)^2}. \quad (50.38)$$

Comparînd această conexiune cu conexiunea mono-alternanță, se observă că se obține aici un curent continuu de două ori mai mare și o putere utilă de patru ori mai mare, dacă valorile maxime ale curenților sînt aceleași în ambele circuite, adică dacă rezistența elementelor redresoare și tensiunile aplicate (măsurate de la priza mediană la o bornă a transformatorului în cazul redresorului dublă-alternanță) sînt aceleași pentru ambele conexiuni.

Puterea debitată depinde de U_m , R_s și R_i , în același mod ca la circuitul mono-alternanță.

Din expresiile date se poate vedea că pierderea de putere într-un element redresor în conexiunea dublă-alternanță este numai un sfert din puterea corespunzătoare în conexiunea mono-alternanță, pentru același curent I_d în sarcină.

Ca o consecință a utilizării ambelor alternanțe ale tensiunii de alimentare la redresorul dublă-alternanță, transformarea curentului alternativ în curent continuu este mult mai completă decît la circuitul mono-alternanță și o proporție mai mare din puterea dezvoltată în sarcină este putere utilă, adică putere de curent continuu. Pentru acest motiv, randamentul redresării crește. Puterea totală furnizată circuitului este:

$$P_{in} = (R_i + R_s) I_{de}^2 = \frac{U_m^2}{2(R_i + R_s)}. \quad (50.39)$$

Randamentul redresării rezultă din (50.38) și (50.39)

$$\eta_{red} = \frac{P_d}{P_{in}} = 2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_s}} = \frac{81,2}{1 + \frac{R_i}{R_s}} [\%]. \quad (50.40)$$

Această valoare este exact dublul valorii găsite la conexiunea mono-alternanță. Randamentul maxim teoretic pentru redresorul dublă-alternanță este 81,2% și se atinge atunci cînd rezistența de sarcină R_s este foarte mare față de rezistența internă a redresorului R_i . Acest randament maxim corespunde unei puteri debitate

foarte mici, de altfel ca și la redresorul mono-alternanță. Factorul $\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_s}}$ arată

fracțiunea de putere primită de circuit care s-a dat sarcinii, iar factorul $2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^2$ arată ce fracțiune din puterea dată sarcinii este putere de curent continuu. Se observă că factorul $\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_s}}$ care depinde de pierderea din elementele redre-

soare, este același pentru ambele circuite (mono-alternanță și dublă-alternanță), deși pierderea totală în cele două elemente redresoare ale circuitului dublă-alternanță este numai jumătate din pierderea în elementul redresor al circuitului mono-alternanță, cînd puterea debitată este aceeași în ambele circuite.

Factorul de ondulație și factorul de formă pentru redresorul dublă-alternanță, sînt:

$$F = \frac{I_{dm}/\sqrt{2}}{2I_{dm}/\pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11; \quad (50.41)$$

$$\gamma = \sqrt{(1,11)^2 - 1} = 0,48. \quad (50.42)$$

Se observă că factorul de ondulație a scăzut de la valoarea 1,21 din cazul conexiunii mono-alternanță, la valoarea 0,48.

După cum se vede din fig. 120a, catodii ambelor elemente redresoare se pot lega împreună în circuitul dublă-alternanță.

Aceasta permite folosirea unui mutator cu arc de mercur, în care doi anodi poartă curentul de la același catod sau a unor tuburi cu vid sau cu gaz cu catod comun și doi anodi în același balon.

În tabela 9 sînt indicate constantele principale ale formelor de undă ale curentului și tensiunii în circuitele de redresare mono-alternanță și dublă-alternanță.

51. Redresor cu diode termoionice cu gaz. a) *Circuit mono-alternanță.* În circuitul din fig. 122a se poate utiliza un gazotron pentru a produce un curent continuu în rezistența de sarcină R_s . Gazotronul aparține grupului 2 de elemente redresoare; forma idealizată a caracteristicii sale este reprodusă în fig. 122b. Funcționarea acestui circuit este puțin diferită de cazul cînd s-ar utiliza un element redresor din grupul 1, deoarece conducția prin tub nu apare decît după ce tensiunea aplicată u atinge valoarea tensiunii de aprindere a tubului și încetează de îndată ce tensiunea u scade sub valoarea constantă U_0 a căderii de tensiune pe elementul redresor.

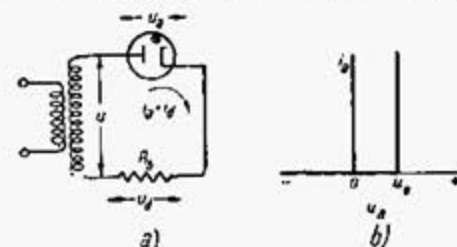


Fig. 122. — Circuit redresor mono-alternanță cu element din grupul 2 (diodă cu gaz): a — schema de principiu; b — caracteristica ideală a diodei cu gaz.

Tabela 9. Constantele formelor de undă la redresoarele monofazate

Forma de undă	Formă sinusoidală	Formă redresată mono-alternanță	Formă redresată dublu-alternanță
Valoarea medie a curentului I_d	0	$\frac{1}{\pi} I_{dm}$	$\frac{2}{\pi} I_{dm}$
Valoarea eficace a curentului I_{de}	$\frac{1}{2} I_{dm}$	$\frac{1}{2} I_{dm}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} I_{dm}$
Factorul de formă F	—	$\frac{\pi}{\pi} = 1,57$	$\frac{\pi}{2\pi} = 1,11$
Factorul de ondulație γ	—	1,21	0,48
Componența alternativă de frecvență minimă	ω	ω	2ω
Randamentul maxim al redresorului fără filtru, sau (I_d/I_{de})	I_{dar}	$\frac{1}{2} I_{dm}$	$\frac{4}{5\pi} I_{dm}$
	—	$(\frac{2}{\pi})^2 = 40,6\%$	$2 (\frac{2}{\pi})^2 = 81,2\%$

Tensiunea de aprindere a tubului este mai mare decât tensiunea U_0 , însă diferența dintre ele este mică cu excepția tuburilor de tensiune mare (care pot suporta tensiuni inverse mari). Pentru determinarea momentului de aprindere ($\omega t_a = \alpha_a$) se poate lua în locul tensiunii de aprindere tensiunea U_0 , cînd un calcul prea exact este inutil din punct de vedere practic.

Dacă se scrie echilibrul tensiunilor pentru circuitul din fig. 122a se obține pentru perioada de conducție:

$$u = R_s i_d + U_0. \quad (51.1)$$

Curentul redresat. Dacă tensiunea de alimentare se presupune sinusoidală, se poate scrie:

$$i_d = \frac{U_m \sin \omega t - U_0}{R_s}. \quad (51.2)$$

Această relație este valabilă numai pentru valori pozitive ale curentului i_d . Dacă în serie cu rezistența de sarcină R_s , ar exista o baterie care trebuie încărcată de redresor, forța electromotoare a bateriei s-ar adăuga la căderea de tensiune a tubului și conducția prin tub ar apare la un moment mai târziu, pînă ce tensiunea aplicată u ar depăși suma acestor două tensiuni. Momentul de aprindere al tubului se găsește egalîndu-se cu zero ecuația (51.2):

$$\alpha_a = \arcsin \frac{U_0}{U_m}. \quad (51.3)$$

Dacă tensiunea de aprindere este mult diferită de tensiunea U_0 , în această ecuație ar trebui să se introducă în locul lui U_0 valoarea tensiunii de aprindere. Momentul de stingere a tubului este:

$$\alpha_s = 180^\circ - \alpha_a. \quad (51.4)$$

Conducția prin tub durează atunci:

$$\alpha_c = \alpha_s - \alpha_a. \quad (51.5)$$

Forma de undă a curentului este reprezentată în fig. 123b. Curba punctată din fig. 123a este tensiunea care apare la bornele tubului redresor în timpul unei perioade. Tensiunea crește de la 0 pînă la momentul $\omega t_a = \alpha_a$ apoi rămîne constantă în timpul conducției și are valoarea U_0 . La momentul $\omega t_s = \alpha_s$ tensiunea aplicată circuitului devine mai mică decât căderea de tensiune pe tub și conducția curentului încetează. În timpul alternanței negative, tubul se comportă ca un întrerupător deschis și întreaga tensiune a sursei apare la bornele sale. Valoarea maximă a acestei tensiuni negative este tensiunea inversă de vîrf a circuitului.

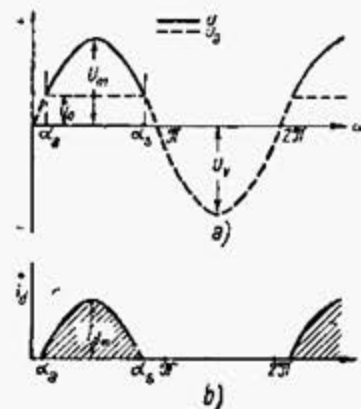


Fig. 123.—Forme de undă la circuitul redresor din fig. 122: a — tensiunea redresată; b — curentul redresat.

Din cele arătate mai sus se poate scrie pentru curentul redresat:

$$i_d = \frac{U_m \sin \omega t - U_0}{R_s} \quad (\alpha_a < \omega t < \alpha_s); \quad (51.6)$$

$$i_d = 0 \quad (\alpha_s < \omega t < 2\pi + \alpha_a); \quad (51.7)$$

curentul mediu prin sarcină este:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} \frac{U_m \sin \omega t - U_0}{R_s} d(\omega t) \quad (51.8)$$

$$= \frac{U_m}{2\pi R_s} \left[-\cos \omega t - \frac{U_0}{U_m} \omega t \right]_{\alpha_a}^{\alpha_s} \quad (51.9)$$

$$= \frac{U_m}{2\pi R_s} \left[-\cos \alpha_s + \cos \alpha_a - \frac{U_0}{U_m} (\alpha_s - \alpha_a) \right]. \quad (51.10)$$

Folosind relațiile trigonometrice cunoscute, relațiile (51.3), (51.4) și (51.10) conduc la:

$$I_d = \frac{U_m}{\pi R_s} \left[\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a \right]; \quad (51.11)$$

tensiunea redresată medie la bornele sarcinii este:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi} \left[\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a \right]. \quad (51.12)$$

Din definiția unghiului de aprindere $\alpha_a = \arcsin \frac{U_0}{U_m}$ se poate vedea că dacă U_m crește, unghiul α_a scade și atât U_d cât și I_d cresc, atingând valorile limită:

$$I_d = \frac{U_m}{\pi R_s} \quad \text{și} \quad U_d = \frac{U_m}{\pi}. \quad (51.13)$$

În majoritatea aplicațiilor în care tensiunea de alimentare este cu mult mai mare decât căderea de tensiune pe tub, unghiul de aprindere α_a este foarte mic și relația (51.13) poate fi folosită cu erori neglijabile.

Curentul de vîrf. Cînd unghiul de conducție ($\alpha_s - \alpha_a$) devine din ce în ce mai mic cu creșterea lui U_0 , valoarea de vîrf a curentului anodic trebuie să crească pentru a putea să rezulte valoarea dorită de curent mediu sau continuu. Curentul anodic de vîrf I_v este un factor important de limitare al gazotroanelor. În cazul circuitului din fig. 122 valoarea acestui curent se poate determina punînd $\sin \omega t = 1$ în (51.2):

$$I_v = \frac{U_m - U_0}{R_s}. \quad (51.14)$$

Folosind relația (51.3), expresia (51.14) se poate scrie în funcție de unghiul de aprindere:

$$I_v = \frac{U_m}{R_s} \left(1 - \frac{U_0}{U_m} \right) = \frac{U_m}{R_s} (1 - \sin \alpha_a). \quad (51.15)$$

Raportul curentului de vîrf către curentul mediu se obține din (51.11) și (51.15)

$$\frac{I_v}{I_d} = \frac{\pi (1 - \sin \alpha_a)}{\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a}. \quad (51.16)$$

La $\alpha_a = 0$ se vede că raportul devine egal cu π după care crește cu α_a .

În fig. 124 se arată variația raportului $\frac{I_v}{I_d}$ în funcție de $\frac{U_0}{U_m} = \sin \alpha_a$.

Puterea. Curba arată că se obțin raporturi foarte mari cînd unghiul de conducție este foarte mic. Valoarea medie a puterii primită de circuitul redresor de la transformatorul de alimentare este:

$$P_{in} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u i_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} U_m \sin \omega t \frac{(U_m \sin \omega t - U_0)}{R_s} d(\omega t). \quad (51.17)$$

După integrare și ținînd seama de valorile unghiurilor α_a și α_s date mai sus se obține:

$$P_{in} = \frac{U_m^2}{2\pi R_s} \left[\frac{\pi}{2} - \alpha_a - \cos \alpha_a \sin \alpha_a \right]. \quad (51.18)$$

Cînd tensiunea de alimentare este mare, se poate lua $\alpha_a \cong 0$ și expresia (51.18) se simplifică:

$$P_{in} = \frac{U_m^2}{4R_s}. \quad (51.19)$$

O parte din puterea primită de circuitul redresor se pierde în tub. Această putere se poate calcula astfel:

$$P_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_a i_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} U_0 \frac{(U_m \sin \omega t - U_0)}{R_s} d(\omega t). \quad (51.20)$$

Dacă se ține seama că U_0 este constant, puterea pierdută în tub rezultă:

$$P_p = U_0 I_d, \quad (51.21)$$

adică este independentă de unghiul de conducție.

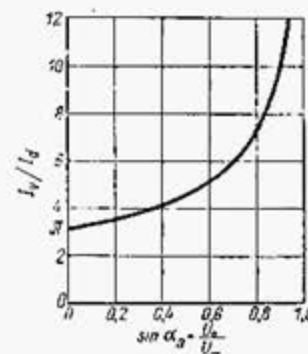


Fig. 124. — Raportul dintre curentul de vîrf și curentul mediu redresat în funcție de $\frac{U_0}{U_m}$ la circuitul redresor din fig. 122.

Randamentul redresării rezultă atunci din relațiile (51.11) și (51.17):

$$\eta_{red} = \frac{P_d}{P_{in}} = \frac{R_s I_d^2}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (51.22)$$

$$\eta_{red} = \left(\frac{2}{\pi} \right) \left[\frac{\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a}{\frac{\pi}{2} - \alpha_a - \cos \alpha_a \sin \alpha_a} \right]^2 \cdot 100\% \quad (51.23)$$

Se observă aici că randamentul redresării este independent de curentul de sarcină; acest fapt rezultă din caracteristica particulară a gazotroanelor de a prezenta o cădere de tensiune constantă și independentă de curent. Randamentul maxim are loc pentru $\alpha_a = 0$ sau cînd tensiunea U_0 este neglijabilă față de U_m . Rezultă de aici recomandarea ca în redresoarele cu gazotroane să se utilizeze tensiuni de alimentare mari, compatibile însă cu datele nominale ale tubului.

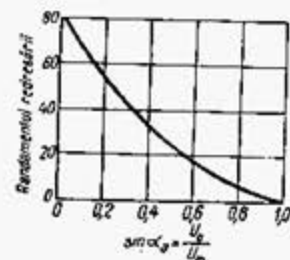


Fig. 125. — Variația randamentului redresării cu raportul $\frac{U_0}{U_m}$, în circuitul redresor din fig. 122.

fig. 122.

În acest caz, randamentul maxim, care se obține pentru $\alpha_a = 0$, pentru acest redresor monofazat mono-alternanță cu sarcină rezistivă, are valoarea $\left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \cdot 100\%$ sau 40,6%.

Cum în realitate α_a nu poate fi nul niciodată, valoarea 40,6% este o valoare teoretică, care se poate realiza cu aproximație numai în cazul redresoarelor cu tensiune mare de ordinul 500 V sau mai mult.

Randamentul redresării calculat mai sus nu trebuie confundat cu randamentul global al redresorului care depinde și de puterea pierdută în transformator și la încălzirea filamentului. În acest circuit, așa cum s-a mai spus și în paragraful precedent, componentele armonice au o valoare importantă și dezvoltă o putere inutilă în rezistența de sarcină, fapt care explică de ce randamentul de redresare are o valoare scăzută.

Tensiunea inversă de vîrf are loc în momentul cînd tensiunea u trece prin valoarea maximă, după cum se arată în fig. 123a, deci:

$$U_v = U_m = \sqrt{2} U$$

în care U este valoarea eficace a tensiunii de alimentare.

În acest circuit redresor, curentul de sarcină traversează bobinajul secundar al transformatorului ca și în cazul fig. 118 și produce o forță magnetomotoare continuă în miezul de fier; dacă transformatorul nu este construit cu întrefier suficient de mare, se poate produce o saturație de curent continuu a miezului, care poate să crească curentul primar la valori periculoase. Deoarece un transformator cu întrefier mare este costisitor, circuitul mono-alternanță nu se folosește de obicei în aplicațiile care comportă curenți redresați mari.

β) Circuit dublă-alternanță. Curentul și tensiunea redresată. În fig. 126 se arată un circuit dublă-alternanță folosind două gazotroane.

Cei doi curenți anodici se pot obține scriind ecuațiile circuitului pe cele două bucle:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= \frac{U_m \sin \omega t - U_0}{R_s} \\ i_{a2} &= 0 \end{aligned} \right\} \alpha_a < \omega t < \alpha_s \quad (51.26)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= 0 \\ i_{a2} &= \frac{-U_m \sin \omega t - U_0}{R_s} \end{aligned} \right\} (\pi - \alpha_a) < \omega t < (\pi + \alpha_s) \quad (51.27)$$

În fig. 126b se arată forma curentului redresat prin sarcină. Unghiurile α_a și α_s sînt date de aceeași expresie ca pentru redresorul mono-alternanță (expresiile 51.3 și 51.4), adică se presupune aceleași căderi de tensiune pentru ambele tuburi.

Prin faptul că în același interval de timp numărul pulsațiilor de curent redresat este exact dublu, valoarea medie a curentului în sarcină și tensiunea va fi dublul valorii din cazul circuitului mono-alternanță:

$$I_d = \frac{2U_m}{\pi R_s} \left[\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a \right]; \quad (51.28)$$

$$U_d = \frac{2U_m}{\pi} \left[\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a \right]. \quad (51.29)$$

Dacă tensiunea de alimentare este mare se poate lua $\alpha_a \cong 0$ și expresiile (51.28) și (51.29) au valorile limită:

$$I_d = \frac{2U_m}{\pi R_s}, \quad U_d = \frac{2U_m}{\pi} \quad (51.30)$$

Se observă aici că U_m este amplitudinea tensiunii pe o jumătate a secundarului transformatorului, adică tensiunea totală pe secundarul transformatorului este $2U_m$; din acest motiv, tensiunea continuă obținută la bornele sarcinii este de două ori mai mare decît în cazul circuitului mono-alternanță. Deoarece curentul redresat este de două ori mai mare, raportul dintre curentul de vîrf al unui tub și curentul mediu în sarcină se reduce la jumătate. Curba dată în fig. 124 pentru variația acestui raport în funcție de unghiul α_a se poate folosi și în cazul redresorului dublă-alternanță împărțind ordonatele prin doi.

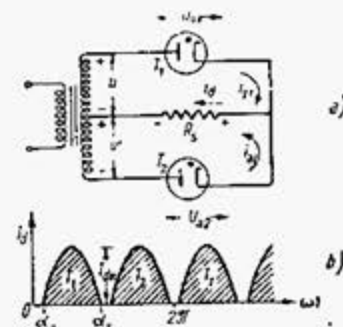


Fig. 126. — Circuit redresor dublă-alternanță cu elemente din grupul 2 (diode cu gaz): a — schema de principiu; b — forma de undă a curentului redresat.

Randamentul redresării. Deoarece circuitul redresor dublă-alternanță din fig. 126 este în fond compus din două redresoare mono-alternanță, atunci randamentul redresorului este:

$$\eta_{red} = \frac{4}{\pi} \frac{\left[\cos \alpha_a - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_a \right) \sin \alpha_a \right]^2}{\frac{\pi}{2} - \alpha_a - \cos \alpha_a \sin \alpha_a} \cdot 100\% \quad (51.31)$$

Valoarea maximă a acestui randament are loc pentru $\alpha_a = 0$, iar pentru valori apropiate de zero, adică $\alpha_a \ll \frac{\pi}{2}$, $\cos \alpha_a \approx 1$, $\sin \alpha_a \approx \alpha_a$ și expresia (51.31) se simplifică:

$$\eta_{red} = \frac{8}{\pi^2} \left[1 - \frac{\pi}{2} \alpha_a \right]^2 \cdot 100\% \quad (51.32)$$

Se vede că pentru $\alpha_a = 0$ randamentul teoretic maxim al redresorului dublă-alternanță cu sarcină rezistivă este $\left(\frac{8}{\pi} \right)^2 \cdot 100\%$ sau 81,2%, deci exact de două ori mai mare decât randamentul redresorului mono-alternanță. Din cauza acestui randament ameliorat, circuitul dublă-alternanță se preferă totdeauna față de circuitul mono-alternanță. În fig. 127 se arată variația randamentului redresării

în funcție de $\frac{U_0}{U_m}$.

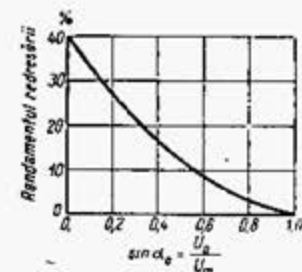


Fig. 127. - Variația randamentului redresării cu raportul $\frac{U_0}{U_m}$, la circuitul din fig. 126.

Tensiunea inversă. Pentru a găsi tensiunea inversă maximă, se scrie suma tensiunilor pe bucla exterioară a circuitului din fig. 126:

$$2u = 2U_m \sin \omega t = u_{a1} + u_{a2} \quad (51.33)$$

Dacă se alege o semiperioadă în care tubul T_2 conduce și tubul T_1 este stins, tensiunea u_{a1} la bornele tubului T_1 este:

$$u_{a1} = 2U_m \sin \omega t - U_{02} \quad (51.34)$$

Valoarea maximă a acestei tensiuni are loc pentru $\sin \omega t = 1$, astfel încît:

$$(u_{a1})_{max} = 2U_m - U_{02} \quad (51.35)$$

Aceasta este tensiunea inversă de vîrf pe tubul T_1 . Dacă U_m este mare în raport cu U_0 , tensiunea inversă de vîrf a redresorului dublă-alternanță se poate lua:

$$U_v = 2U_m \quad (51.36)$$

În redresorul dublă-alternanță, componentele continue ale curenților anodici străbat secundarul transformatorului în sensuri opuse de la priza mediană spre capete. În consecință, dacă cele două tuburi sînt identice și circuitul echilibrat, curenții sînt identici și forțele magnetomotoare continue se anulează. Nu apare nici o saturație de curent continuu în miez, ceea ce permite utilizarea unui transformator de construcție normală.

γ) Circuite cu gazotroane în paralel. Cînd curentul printr-un tub depășește valoarea nominală admisă (curentul mediu sau curentul de vîrf), gazotronul trebuie înlocuit cu unul mai mare sau în lipsa acestuia, cu două gazotroane în

paralel. Funcționarea în paralel a gazotroanelor cu legătură directă nu este însă posibilă, pentru că nu se poate aprinde decît un singur gazotron. În fig. 128a, se arată caracteristicile tensiune-curent a două gazotroane. Deși gazotroanele sînt de același tip, tensiunile U_{01} și U_{02} nu sînt aproape nici o dată riguros egale. Dacă aceste tuburi se leagă direct în paralel, tensiunea aplicată tubului de sursa de alimentare va crește pînă la valoarea U_{02} cînd tubul T_2 se aprinde; de aici înainte, tensiunea pe tubul T_2 rămîne constantă și tensiunea pe tubul T_1 rămînd inferioară valorii U_{01} , acest tub rămîne stins.

Dacă se leagă însă cîte o rezistență mică în serie cu fiecare tub (fig. 128b) caracteristica tensiune-curent a ansamblului tub-rezistență este dreapta punctată din figură. După aprinderea tubului T_2 , tensiunea U crește de la U_{02} pe măsura creșterii curentului i_{a2} astfel că se poate aprinde mai tîrziu și tubul T_1 . Dacă se alege $R_1 = R_2$, ca în figură, curentul total $i_d = i_{a1} + i_{a2}$ se împarte în mod neegal pe cele două tuburi; tubul cu căderea de tensiune U_0 mai mică preia o parte mai mare din curentul de sarcină. Potrivind valorile R_1 și R_2 se poate obține însă o încărcare egală a tuburilor.

Rezistențele necesare sînt de obicei foarte mici (cîțiva ohmi), la tuburile de curent mare. Diferența $U_{01} - U_{02}$ poate fi de 6-7 V. Pentru a evita pierderea de putere din rezistențele de echilibrare, se poate folosi o mică bobină cu priză mediană, cu aceleași efecte asupra aprinderii tuburilor.

Soluția tuburilor în paralel trebuie evitată ori de cîte ori este posibil deoarece este mai economică să se utilizeze un tub mai mare decît două tuburi mici.

52.) Alte circuite redresoare monofazate. S-au imaginat mai multe circuite redresoare în afară de circuitul mono-alternanță și dublă-alternanță pentru redresarea curentului alternativ monofazat, fiecare circuit avînd avantajele și dezavantajele sale.

Din aceste circuite cele mai importante sînt circuitul în punte și circuitul dublului de tensiune.

α) Circuit redresor în punte. Conexiunea în punte sau montajul Graetz sub două variante este arătată în fig. 129 a și b. Acest circuit permite o redresare dublă-alternanță, folosind un transformator de alimentare fără priză mediană. Această particularitate constituie un avantaj în unele aplicații. În timpul unei perioade în care tensiunea de alimentare este pozitivă (față de sensul convențional arătat în figură) elementele redresoare 1 și 3 conduc curentul, iar elementele 2 și 4 lucrează ca două întreruptoare deschise. Astfel curentul curge prin rezistența de sarcină R_s în sensul pozitiv al curentului i_d . În timpul semiperioadei

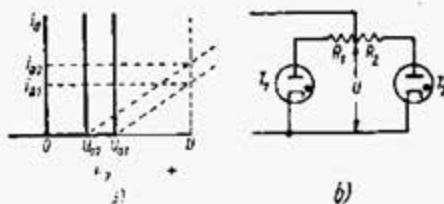


Fig. 128. - Funcționarea în paralel a două gazotroane:

a - caracteristici ideale statice și dinamice, la două gazotroane diferite; b - circuit pentru funcționarea în paralel a două gazotroane.

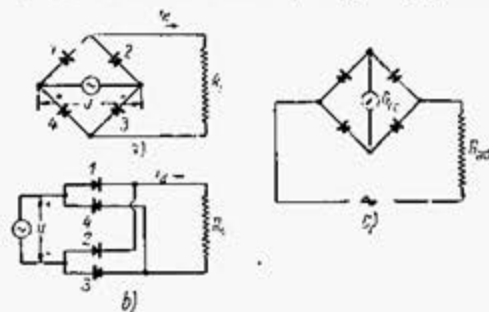


Fig. 129. - Circuit redresor în punte sau Graetz și aplicația sa la instrumentele de măsură: a - circuit în punte; b - circuit în punte (altă reprezentare); c - voltmetru de curent alternativ sau continuu.

următoare, tensiunea u se inversează, intră în acțiune elementele redresoare 2 și 4 iar elementele redresoare 1 și 3 nu conduc. Curentul i_d își păstrează același sens de curgere, astfel încât, în ce privește sarcina, se obține un efect de redresare a ambelor alternanțe. Altfel curenții primari, cît și secundari din transformatorul de alimentare au o formă sinusoidală. În consecință, pentru aceeași putere debitată, acest transformator poate avea dimensiuni mai mici decît transformatorul unui circuit obișnuit cu dublă-alternanță.

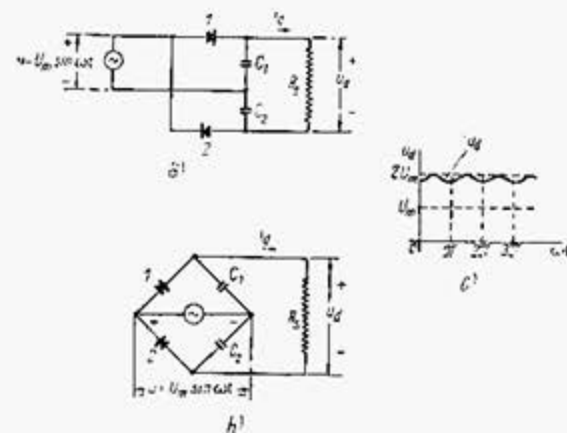


Fig. 130. - Circuit redresor dublor de tensiune.

sensibil de curent continuu pentru măsurarea curenților sau tensiunilor alternative.

β) *Circuit redresor dublor de tensiune.* În unele cazuri interesează un circuit redresor care are proprietatea de a furniza o tensiune continuă mai mare decît valoarea maximă a tensiunii de alimentare. Un astfel de caz se întâlnește la alimentarea tuburilor de raze X care necesită tensiuni anodice înalte. Pentru aceasta se poate folosi circuitul dublor de tensiune reprezentat în fig. 130, care are o tensiune redresată aproape egală cu dublul amplitudinii tensiunii de alimentare, cînd rezistența de sarcină este mare.

Acest circuit funcționează prin încărcări și descărcări alternative ale celor două condensatoare la tensiunea U_m . Ele se descarcă în mod continuu pe rezistența de sarcină la bornele căreia apare o tensiune continuă de aproximativ $2U_m$. În același timp, condensatoarele au și un rol de netezire a pulsațiilor tensiunii redresate. Pe același principiu s-au imaginat circuite multiplicatoare de tensiune, cu un factor 3, sau 4, sau mai mare.

b) Redresoare cu sarcină capacitivă (R-C în paralel)

53. *Redresoare cu kenotroane.* La circuitele cu sarcină R-C în paralel se utilizează de obicei numai kenotroane din cauză că curentul redresat are forma unor pulsuri ascuțite.

Dacă se folosesc totuși gazotroane, trebuie observat să nu se depășească curentul de vîrf maxim admis de tub.

În teoria care urmează se va presupune pentru simplificare elementul redresor ideal, adică fără rezistență interioară.

α) *Circuite mono-alternanță.* Un redresor pentru un amplificator, un receptor radio sau un emițător trebuie să furnizeze un curent și o tensiune redresată, avînd un factor de ondulație mult mai mic decît se obține de la un redresor fără filtru. Filtrele, pe lîngă faptul că reduc ondulația, ameliorează în același timp randamentul redresării, deoarece ele evită trecerea componentelor armonice alternative

în rezistența de sarcină, unde ar disipa o putere inutilă. O formă simplă de filtru se obține punînd un condensator în paralel cu rezistența de sarcină. Dacă valoarea condensatorului se alege astfel încît $X_C \ll R_s$, atunci curenții alternativi găsesc o cale de reacță mică prin condensator, aproape nici un curent alternativ nu mai curge prin sarcină și astfel nu mai produce o tensiune ondulată. Un astfel de filtru se vede în fig. 131a, care reprezintă un redresor mono-alternanță cu sarcină R-C.

Prezența condensatorului schimbă foarte mult condițiile de funcționare ale redresorului, față de cazul cînd sarcina ar fi fost numai o rezistență. În timp ce tensiunea de alimentare a redresorului crește, condensatorul se încarcă la o tensiune egală cu tensiunea redresată și acumulează energie. Cînd tensiunea redresată scade, condensatorul cedează energia sa sarcinii și reușește să mențină tensiunea la bornele sarcinii la o valoare ridicată pe un interval de timp mai lung decît dacă nu ar fi existat condensatorul. În modul acesta se obține un factor de ondulație mai mic. Elementul redresor dă un puls de curent în fiecare perioadă care încarcă condensatorul și apoi se comportă ca un întrerupător care întrerupe legătura cu sursa și permite condensatorului să se descarce pe rezistența de sarcină. Dacă constanta de timp a ansamblului condensator și rezistența de sarcină este mare în raport cu durata unei perioade, descărcarea va fi lentă și tensiunea obținută, aproape constantă pe întreaga perioadă. Elementul redresor conduce sub forma unor pulsuri de scurtă durată și circuitul este excitat printr-o serie de curenți tranzitorii, așa cum se arată în fig. 131 b și c.

Deoarece rezistența elementului redresor este mică, analiza acestui circuit poate fi mult simplificată, luînd în considerare un element redresor ideal cu rezistență nulă. Atunci, referindu-ne la fig. 131, tensiunea condensatorului în timpul intervalului de încărcare $\omega t_1 - \omega t_2$ este egală cu tensiunea sursei de alimentare:

$$u_c = u = U_m \sin \omega t \quad (\omega t_1 < \omega t < \omega t_2) \quad (53.1)$$

Curentul redresat. În același timp cei trei curenți din schemă satisfac relația:

$$i_d = i_c + i_s \quad (53.2)$$

$$i_s = \frac{U_m}{R_s} \sin \omega t \quad (\omega t_1 < \omega t < \omega t_2) \quad (53.3)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t. \quad (53.4)$$

Curentul prin elementul redresor în timpul conducției este un puls a cărei expresie analitică se poate pune sub forma:

$$i_d = U_m \left(\frac{1}{R_s} \sin \omega t + \omega C \cos \omega t \right) \text{ pentru } \omega t_1 < \omega t < \omega t_2. \quad (53.5)$$

La ωt_2 , cînd conducția încetează sau $i_d = 0$, ecuația (53.2) se poate scrie:

$$i_c = -i_s$$

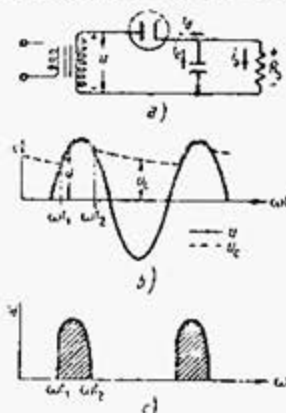


Fig. 131. - Circuit redresor mono-alternanță cu kenotron și sarcină R-C:

a - schema de principiu; b - forma de undă a tensiunii redresate și a tensiunii de alimentare; c - forma de undă a curentului redresat.

și:

$$\omega C \cos \omega t_2 = -\frac{1}{R_s} \sin \omega t_2 \quad (53.6)$$

din care:

$$\omega t_2 = \arctg(-\omega R_s C).$$

Unghiul ωt_2 este în cadranul al doilea, astfel încît ecuația (53.5) se poate scrie:

$$i_d = \frac{U_m}{R_s} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} \sin(\omega t - \varphi),$$

în care:

$$\varphi = \arctg(\omega R_s C) = \pi - \arctg(-\omega R_s C), \quad (53.7)$$

din care rezultă:

$$i_d = \frac{U_m}{R_s} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} \sin(\omega t_2 - \omega t) \text{ pentru } \omega t_1 < \omega t < \omega t_2 \quad (53.8)$$

care este o expresie simplificată a pulsului de curent prin elementul redresor.

Ecuațiile (53.6) și (53.8) introduc termenul $\omega R_s C$, un parametru fără dimensiuni, care se întâlnește frecvent în analiza circuitelor redresoare cu sarcină $R-C$ și care este caracteristic pentru condițiile de funcționare a circuitului. Valori mari ale parametrului $\omega R_s C$ pot însemna valori mari ale capacității sau ale rezistenței de sarcină (curent mic), pe cînd valori mici ale lui $\omega R_s C$ înseamnă capacități mici sau rezistențe de sarcină mici (curent mare). Parametrul R_s poate fi menținut la o valoare fixă și atunci variațiile parametrului $\omega R_s C$ înseamnă variațiile capacității C sau viceversa. Rezultatele calculului privind filtrele cu condensator se exprimă de obicei în funcție de $\omega R_s C$.

Începînd de la ωt_2 , tensiunea sursei de alimentare scade mai repede decît tensiunea condensatorului și devine mai mică decît u_c . Atunci catodul elementului redresat devine pozitiv față de anod, conducția prin tub încetează imediat și legătura cu sursa se întrerupe. În perioada de la ωt_2 la $2\pi + \omega t_1$ avem prin urmare:

$$-i_c = i_s, \quad (53.9)$$

sau:

$$-C \frac{du_c}{dt} = \frac{u_c}{R_s}$$

din care:

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{R_s C} = 0. \quad (53.10)$$

Ecuația (53.10) este ecuația diferențială a circuitului și are soluția:

$$u_c = A e^{-\frac{t}{R_s C}};$$

pentru $\omega t = \omega t_2$, $u_c = U_m \sin \omega t_2$, astfel încît după evaluarea constantei A (53.10) devine:

$$u_c = U_m \sin \omega t_2 e^{-\frac{(\omega t - \omega t_2)}{\omega R_s C}}, \quad (53.11)$$

care este expresia tensiunii condensatorului în timpul intervalului de descărcare. Se poate observa că pentru valori mari $\omega R_s C$, adică valoare mare a condensa-

torului sau a rezistenței de sarcină (curent de sarcină mic) exponentul este mic și u_c va fi mai constant sau unduța mică. Prin urmare, la un astfel de circuit de filtraj cu condensator, unduța crește cînd curentul de sarcină crește.

La $\omega t_1 + 2\pi$ se poate vedea din fig. 131 că:

$$u_c = U_m \sin(\omega t_1 + 2\pi)$$

și din ecuația (53.11) se poate scrie:

$$U_m \sin \omega t_1 = U_m \sin \omega t_2 e^{-\frac{(\omega t_1 + 2\pi - \omega t_2)}{\omega R_s C}},$$

din care:

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 e^{-\frac{(\omega t_1 + 2\pi - \omega t_2)}{\omega R_s C}} \quad (53.12)$$

Aceasta este o ecuație transcendentă care se poate rezolva grafic. Dacă însă se presupune că tensiunea condensatorului la momentul $\omega t_1 + 2\pi$ este aceeași ca tensiunea la momentul $\omega t = 2\pi$, atunci ecuația (53.12) se poate rezolva în funcție de ωt_1 . Această presupunere nu introduce o eroare apreciabilă pentru majoritatea valorilor uzuale ale sarcinii. Folosind această ipoteză se poate găsi momentul de începere al conducției prin elementul redresor:

$$\omega t_1 = \arcsin \left[\frac{\omega R_s C}{\sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2}} e^{-\frac{(2\pi - \omega t_2)}{\omega R_s C}} \right]. \quad (53.13)$$

În fig. 132, sînt trasate curbele pentru unghiurile de începere a conducției ωt_1 și de terminare a conducției ωt_2 , în funcție de $\omega R_s C$.

Avînd valorile pentru ωt_1 și ωt_2 în funcție de $\omega R_s C$, este posibil să se traseze forma de undă a curentului din ecuația (53.12). În fig. 133 sînt reprezentate două

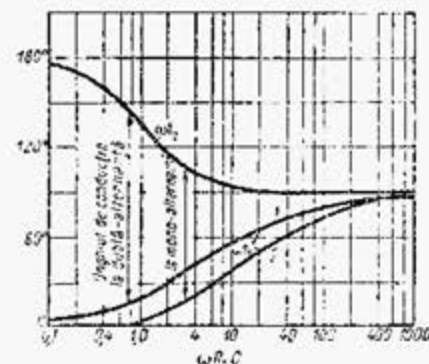


Fig. 132. — Variația unghiului de conducție la circuitul redresor cu sarcină $R-C$:
1 — circuit dublu-alternanță; 2 — circuit mono-alternanță.

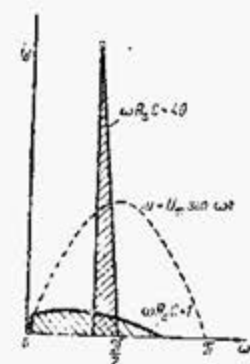


Fig. 133. — Formele de undă ale curentului redresat, la circuitul din fig. 131, pentru diferite valori C și $R_s = \text{constant}$.

forme ale pulsului de curent pentru două valori mult diferite ale parametrului $\omega R_s C$. Se observă că deoarece ωt_2 scade și ωt_1 crește cu creșterea valorii lui $\omega R_s C$, unghiul de conducție este mic la valori mari ale capacității. În același timp, ecuația arată că valoarea de vîrf a curentului i_d crește cu $\omega R_s C$. Prin urmare, curenții de sarcină mici (R_s mare) produc pulsuri înguste și ascuțite; curenți de sarcină mari (R_s mic) produc pulsuri largi și aplatisate.

Tensiunea medie redresată la bornele sarcinii se poate obține luând valoarea medie a tensiunilor date în ecuațiile (53.1) și (53.11) pe o perioadă; astfel:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} U_m \sin \omega t d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_2}^{2\pi + \omega t_1} U_m \sin \omega t_2 \xi^{\frac{(\omega t - \omega t_1)}{\omega R_s C}} d(\omega t). \quad (53.14)$$

După integrarea și substituția ecuațiilor (53.12) și (53.6) aceasta se reduce la:

$$U_d = \frac{U_m}{2\pi} \left[1 + \omega^2 R_s^2 C^2 \right] [1 - \cos(\omega t_2 - \omega t_1)], \quad (53.15)$$

expresie care leagă tensiunea medie redresată de amplitudinea tensiunii de alimentare pentru diferite valori $\omega R_s C$. Această expresie s-a obținut prin neglijarea căderii de tensiune pe elementul redresor.

În fig. 134a, s-a trasat raportul $\frac{U_d}{U_m}$ în funcție de parametrul $\omega R_s C$.

Curba 1 arată că pentru valori mici ale lui C raportul se apropie de $\frac{1}{\pi}$, valoare

întilnită la redresorul monoalternanță cu sarcina rezistivă. Pentru valori mari ale lui C , tensiunea medie redresată se apropie foarte mult de amplitudinea tensiunii de alimentare. Pentru a obține un reglaj de tensiune bun se vede că trebuie să utilizăm o valoare suficient de mare a capacității, astfel încât să ne situăm pe partea de sus a curbelor din fig. 134a.

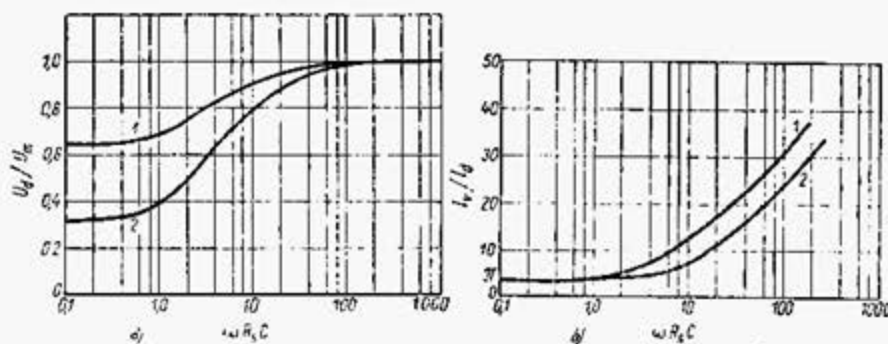


Fig. 134. - Variația raportului U_d/U_m cu $\omega R_s C$ (diagrama a) și a raportului I_p/I_d cu $\omega R_s C$ (diagrama b). În circuitul redresor cu sarcină $R-C$:
1 - circuit dublu-alternanță; 2 - circuit mono-alternanță.

Curentul de vîrf. Pulsurile de curent foarte ascuțite solicită mult elementele redresoare, de aceea este necesar să se cunoască la proiectarea redresorului raportul dintre curentul de vîrf și curentul mediu. Din (53.8) se vede că valoarea maximă a lui i_d sau curentul de vîrf I_p are loc pentru $\omega t = \omega t_2 - \frac{\pi}{2}$. Aceasta este adevărat cu condiția ca ωt să cadă în intervalul unghiului de conducție, altfel

I_p se produce la începutul perioadei de conducție ceea ce se poate vedea din fig. 133. Pentru a determina în care situație ne aflăm, cercetăm pentru care valoare a unghiului ωt curentul dat de expresia (53.8) trece prin valoarea maximă. Dacă I_m este momentul cînd i_d trece prin maximum, atunci:

$$\omega t_2 - \omega t_m = \frac{\pi}{2}, \text{ sau: } \omega t_m = \omega t_2 - \frac{\pi}{2}. \quad (53.16)$$

Momentul limită între cele două situații are loc cînd începutul conducției coincide cu maximum lui i_d , sau:

$$\omega t_1 = \omega t_m = \omega t_2 - \frac{\pi}{2}. \quad (53.17)$$

Atît ωt_1 cît și ωt_2 sînt funcții de $\omega R_s C$ și valoarea limită are loc pentru $\omega R_s C = 3,5$; atunci, după cum se vede din fig. 132:

$$\omega t_2 - \omega t_1 = \frac{\pi}{2}.$$

În consecință, pentru toate valorile $\omega R_s C < 3,5$ curentul de vîrf are loc cînd $\sin(\omega t_2 - \omega t) = 1$ și este dat de expresia:

$$I_p = \frac{U_m}{R_s} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2}. \quad (53.18)$$

Pentru toate valorile $\omega R_s C > 3,5$, curentul de vîrf are loc la începutul perioadei de conducție sau la $\omega t = \omega t_1$:

$$I_p = \frac{U_m}{R_s} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} \sin(\omega t_2 - \omega t_1). \quad (53.19)$$

Raportul între curentul de vîrf I_p și curentul mediu I_d , pentru $\omega R_s C < 3,5$, este:

$$\frac{I_p}{I_d} = \frac{2\pi}{1 - \cos(\omega t_2 - \omega t_1)}, \quad (53.20)$$

iar pentru $\omega R_s C > 3,5$, este:

$$\frac{I_p}{I_d} = \frac{2\pi \sin(\omega t_2 - \omega t_1)}{1 - \cos(\omega t_2 - \omega t_1)}. \quad (53.21)$$

În fig. 134b, s-a reprezentat variația raportului $\frac{I_p}{I_d}$ în funcție de $\omega R_s C$.

Factorul de ondulație se poate găsi calculînd în prealabil valoarea eficace a tensiunii redresate

$$U_{de} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} U_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t_2}^{2\pi + \omega t_1} U_m^2 \sin^2 \omega t_2 \xi^{\frac{2(\omega t - \omega t_1)}{\omega R_s C}} d(\omega t)} \quad (53.22)$$

și înlocuind această valoare, cum și valoarea U_d din (53.15) în formula de definiție a factorului de undulație, se obține o expresie complicată pentru factorul de undulație care se preferă să se reprezinte sub forma unei curbe în fig. 135.

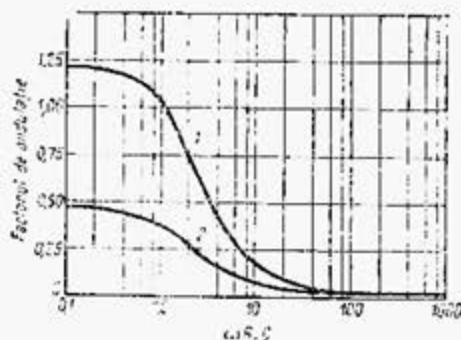


Fig. 135. - Variația factorului de undulație cu $\omega R_s C$ în circuitul redresor cu sarcină $R-C$: 1 - circuit mono-alternanță; 2 - circuit dublă-alternanță.

obicei numai pentru acele aplicații în care se cer curenți medii mici și tensiuni mari (R_s - mare).

Dacă se menține curentul mediu la valori mici, curenții de vîrf pot cădea în limitele admise de elementul redresor. O aplicație de acest fel se întâlnește la sursele de alimentare anodice ale oscilografelor catodice.

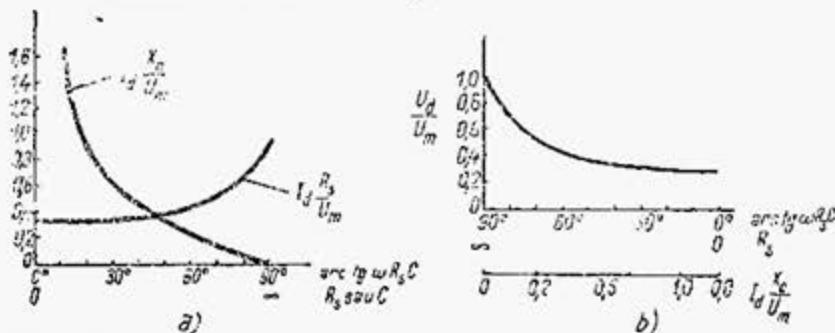


Fig. 136. - Diagrame generalizate pentru variația curentului și tensiunii medii redresate cu rezistența de sarcină și capacitatea de filtrație.

Diagrama generalizată. În fig. 136 sînt reprezentate cîteva diagrame generalizate, care arată efectul rezistenței de sarcină și a condensatorului de filtrație asupra valorilor medii a curentului I_d și a tensiunii redresate U_d .

Curba $I_d \frac{R_s}{U_m}$ din fig. 136a se poate folosi pentru a determina variația curentului mediu redresat I_d cu capacitatea de filtrație C cînd se mențin constante tensiunea de alimentare U_m și rezistența de sarcină R_s .

Expresia analitică corespunzătoare acestei curbe se obține imediat din expresia lui U_d , dată mai sus, știind că $I_d = \frac{U_d}{R_s}$:

$$I_d = \frac{U_m}{2\pi R_s} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} (1 - \cos x_c),$$

în care $x_c = \omega t_2 - \omega t_1$ este unghiul de conducție a curentului prin redresor.

Împărțind cu $\frac{U_m}{R_s}$, se obține expresia căutată:

$$I_d \frac{R_s}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} (1 - \cos x_c).$$

Curba $I_d \frac{R_s}{U_m}$ se poate folosi pentru a determina variația curentului mediu redresat I_d cu rezistența de sarcină, cînd se mențin constante tensiunea de alimentare U_m și capacitatea de filtrație C .

Expresia analitică corespunzătoare acestei curbe se obține imediat din expresia lui I_d , dată mai sus, împărțind cu $\frac{U_m}{X_c}$:

$$I_d \frac{X_c}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 R_s^2 C^2}} (1 - \cos x_c).$$

în care: $X_c = \frac{1}{\omega C}$.

Curba $\frac{U_d}{U_m}$ din fig. 136b, corespunde expresiei:

$$\frac{U_d}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} (1 - \cos x_c).$$

Ea nu este decît o altă reprezentare a curbei I din fig. 131a, obținută printr-o schimbare a variabilei din abscisă. Sub această formă, curba dată permite să se determine variația tensiunii medii redresate U_d cu curentul de sarcină I_d , cînd toți parametrii circuitului rămîn constanți cu excepția rezistenței de sarcină R_s .

β) Circuit dublă-alternanță. Filtrul $R-C$ poate fi utilizat și la un redresor dublă alternanță, așa cum se arată în fig. 137. Funcționarea este în general similară cu a circuitului mono-alternanță cu singura deosebire că timpul de descărcare al condensatorului este limitat pînă la momentul $\pi + \omega t_1$ în loc de $2\pi + \omega t_1$. Această situație dă un reglaj de tensiune mult mai bun și un factor de undulație

mai mic pentru aceeași valoare $\omega R_s C$. Cu schimbările de limită arătate mai sus în funcționarea elementului redresor, ecuațiile date pentru i_d , i_c și i_s rămân valabile mai departe. Momentul de începere a conducerii ωt_1 poate fi redeterminat punând π în loc de 2π în obținerea ecuației (53.12), din care rezultă:

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 \in \frac{\omega t_1 + \pi - \omega t_2}{\omega R_s C} \quad (53.23)$$

În fig. 132 s-a trasat curba ωt_1 în funcție de $\omega R_s C$ pentru redresorul dublă-alternanță. Valorile ωt_2 sînt bineînțelese aceleași ca pentru circuitul mono-alternanță, deoarece schimbarea numărului pulsurilor pe o perioadă nu modifică condițiile care determină încetarea conducerii.

Tensiunea medie redresată se determină luînd valoarea medie a tensiunilor condensatorului de la ωt_1 la $\pi + \omega t_1$ și observînd că avem două perioade de acest fel pe un ciclu. Rezultă atunci următoarea expresie a tensiunii medii redresate:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi} \sqrt{1 + \omega^2 R_s^2 C^2} [1 - \cos(\omega t_2 - \omega t_1)] \quad (53.24)$$

În fig. 134 a, (curba 2) s-a reprezentat variația raportului $\frac{U_d}{U_m}$ pentru redresorul du-

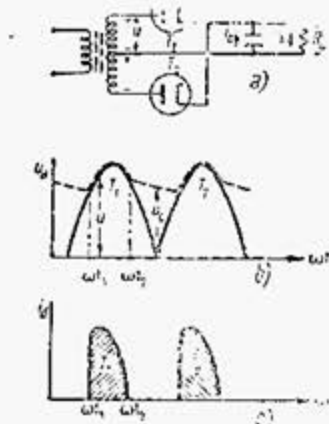


Fig. 137. - Circuit redresor dublă-alternanță cu kenotroane și sarcină R-C:

a - schema de principiu; b - forma de undă a tensiunii redresate; c - forma de undă a curentului redresat.

blă-alternanță cu condensator. Se poate vedea că variațiile tensiunii U_d produse de variația rezistenței de sarcină R_s de la valori mici la valori mari, sînt mult mai mici pentru redresorul dublă-alternanță decît pentru redresorul mono-alternanță. Reglajul de tensiune al circuitului este deci mult mai bun.

Factorul de ondulație care se obține în circuitul cu dublă-alternanță se poate calcula în modul arătat pentru circuitul mono-alternanță. În fig. 135 s-a arătat variația acestui factor cu $\omega R_s C$. Se vede că în circuitul dublă-alternanță s-a obținut o ameliorare importantă a factorului de ondulație la sarcini mici.

54. Proiectarea filtrelor R-C. O teorie mai exactă, dar mult mai complicată decît cea dezvoltată mai sus, ține seamă și de rezistența internă a tubului sau a elementului redresor oarecare utilizat în circuit.

Pentru a ușura proiectarea filtrelor R-C se preferă să se folosească de obicei diagrame ca acelea arătate în fig. 139-143.

a) *Rezistența internă a elementului redresor.* Pentru circuitele care folosesc tuburi cu vid înaintat, analiza circuitului redresor se bazează pe ipoteza justificată experimental, că un tub redresor cu vid înaintat poate fi înlocuit într-un circuit echivalent printr-o rezistență fixă în serie cu un întreruptor sincron sau un element redresor ideal. Valoarea rezistenței echivalente depinde de mărimea care se cere să se determine: valorile de vîrf, medii sau eficace ale tensiunilor și curenților din circuit. *Rezistența de vîrf R_{iv}* a unei diode redresoare se definește ca raportul

dintre valoarea de vîrf a tensiunii anodice a diodei și valoarea de vîrf corespunzătoare a curentului anodic.

Rezistența medie R_{im} a unei diode se definește ca raportul dintre tensiunea anodică medie în timpul perioadei de conducție către curentul anodic mediu în

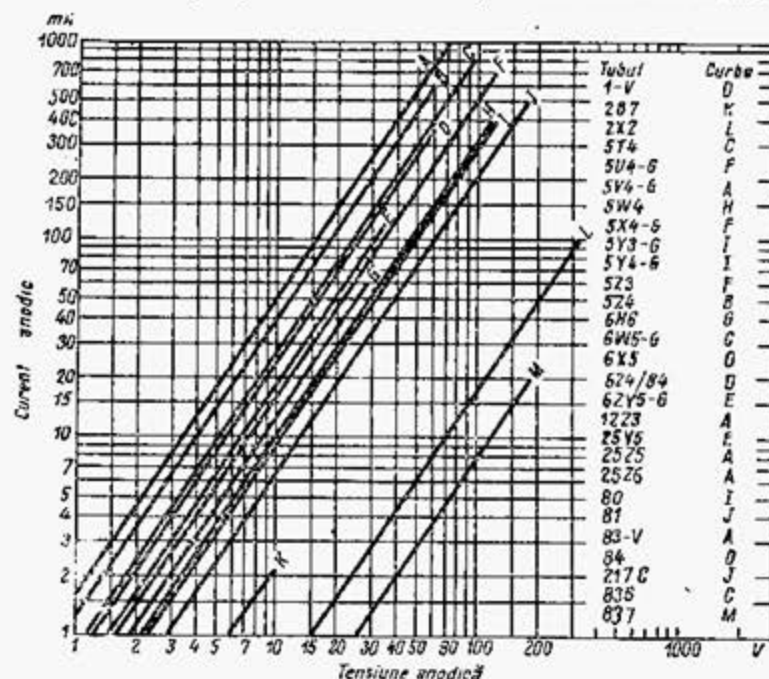


Fig. 138. - Caracteristici statice medii ale diverselor kenotroane.

timpul aceleiași perioade de conducție. *Rezistența eficace R_{ie}* a diodei se definește ca raportul dintre disipația anodică a diodei către pătratul valorii eficace a curentului anodic. Pentru diode cu vid înaintat raportul acestor trei valori de rezistență este practic independent de amplitudinea curentului și de constantele circuitului, astfel că se pot admite cu o precizie de 5%, următoarele relații:

$$R_{ie} = 1,075 R_{iv}; \quad R_{im} = 1,14 R_{iv} \quad (54.1)$$

În calcule, se poate adesea înlocui R_{im} cu R_{iv} fără a comite o eroare apreciabilă. De fapt această eroare este mai mică decît eroarea inevitabilă care există la utilizarea unor diagrame. Fig. 138 arată o serie de curbe din care se poate obține rezistența de vîrf a tuburilor redresoare cu vid înaintat.

Pentru circuitele care utilizează tuburi redresoare cu gaz, analiza se bazează pe un circuit echivalent în care dioda se înlocuiește printr-o rezistență fixă mică și o forță contraelectromotoare U_0 egală cu căderea de tensiune pe tub în serie cu un întreruptor sincron sau un element redresor ideal. Cele trei valori de rezistență echivalentă a tuburilor redresoare cu gaz sînt identice și se pot lua egale cu aproximativ 4Ω la tuburile mici. Forța contraelectromotoare U_0 , care are o

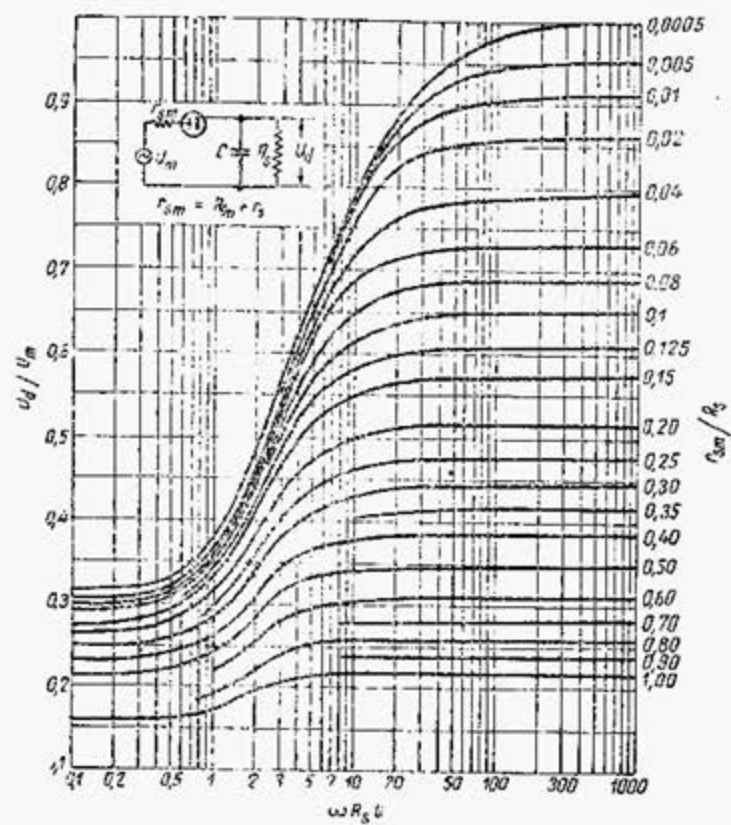


Fig. 139. — Variația raportului U_d/U_m cu $\omega R_s C$, la redresoarele monofazate mono-alternanță cu sarcină $R-C$.

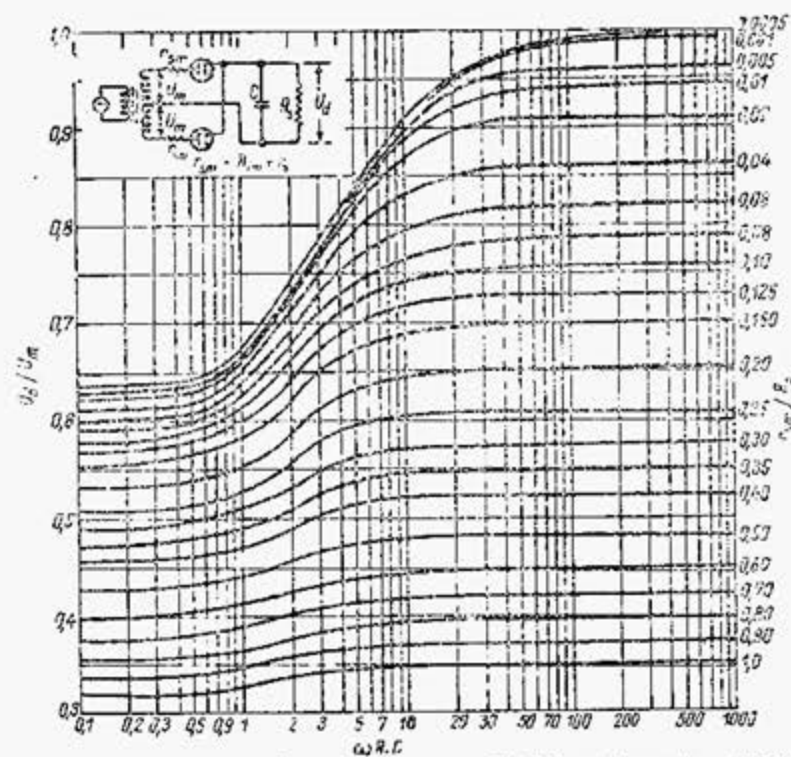


Fig. 140. — Variația raportului U_d/U_m cu $\omega R_s C$, la redresoarele monofazate dublă-alternanță cu sarcină $R-C$.

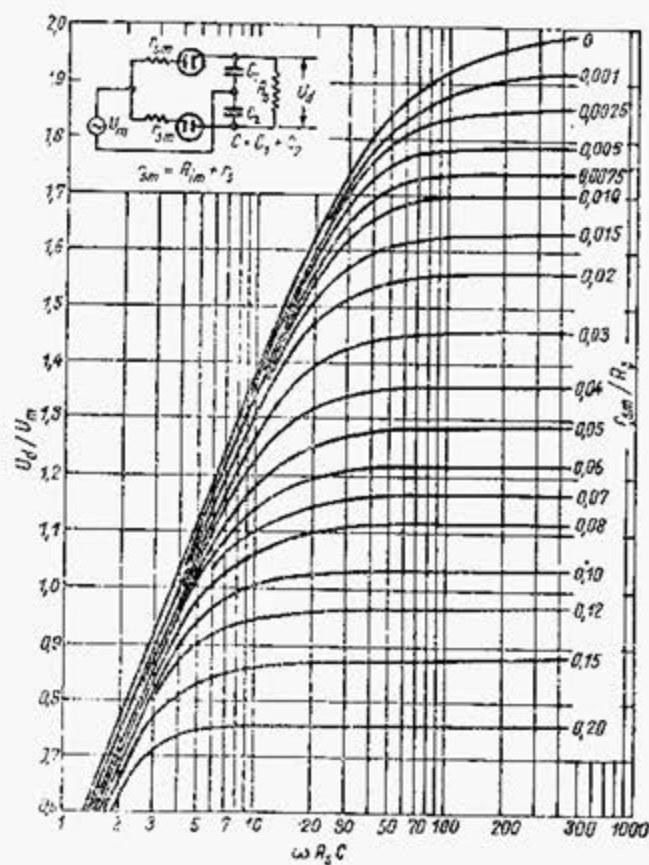


Fig. 111. — Variația raportului U_d/U_m cu $\omega R_s C$, la redresoarele monofazate dubloare de tensiune.

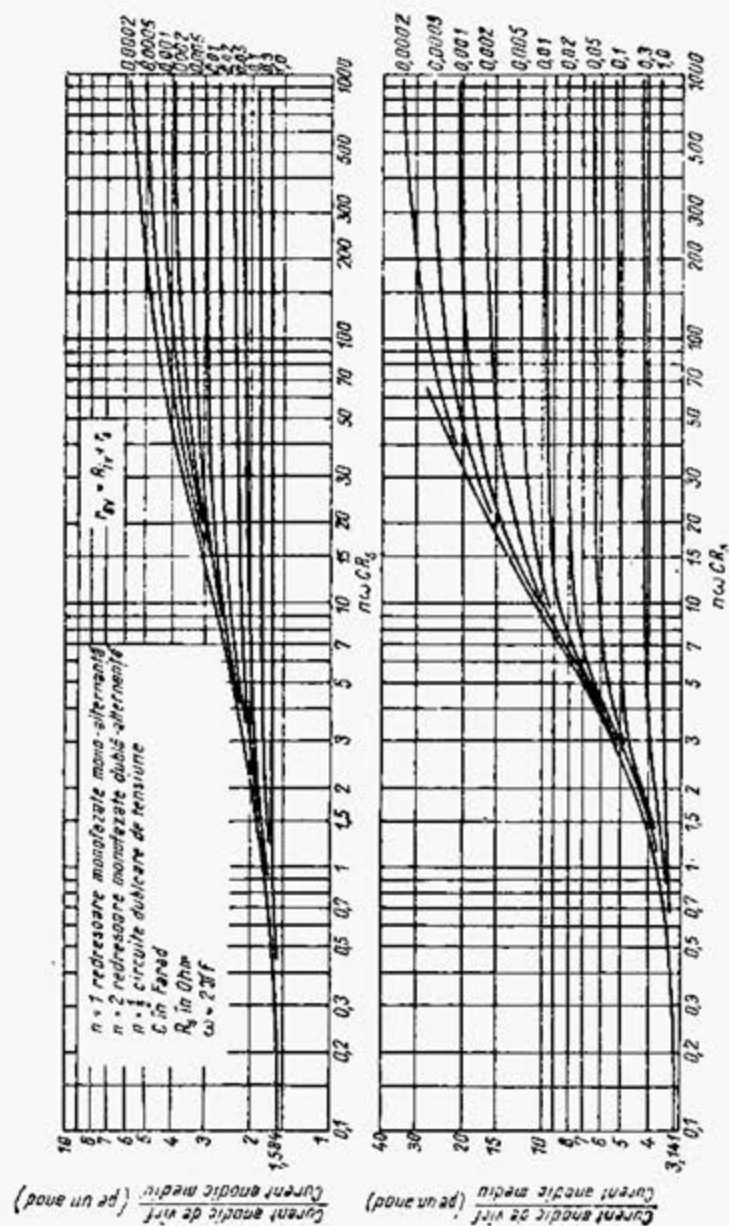


Fig. 112. — Variația raportului dintre curentul anodic efectiv și curentul anodic de vîrf și curentul anodic mediu, în funcție de $n\omega C R_s$.

valoare aproximativă de 10 V la tuburile mici, se poate lua în considerare la calculul redresorului, scăzând din tensiunea medie redresată calculată în ipoteza unei forțe contraelectromotoare nule această valoare constantă de 10 V. Eroarea care rezultă în calcul este mică dacă amplitudinea tensiunii alternative depășește 50 V.

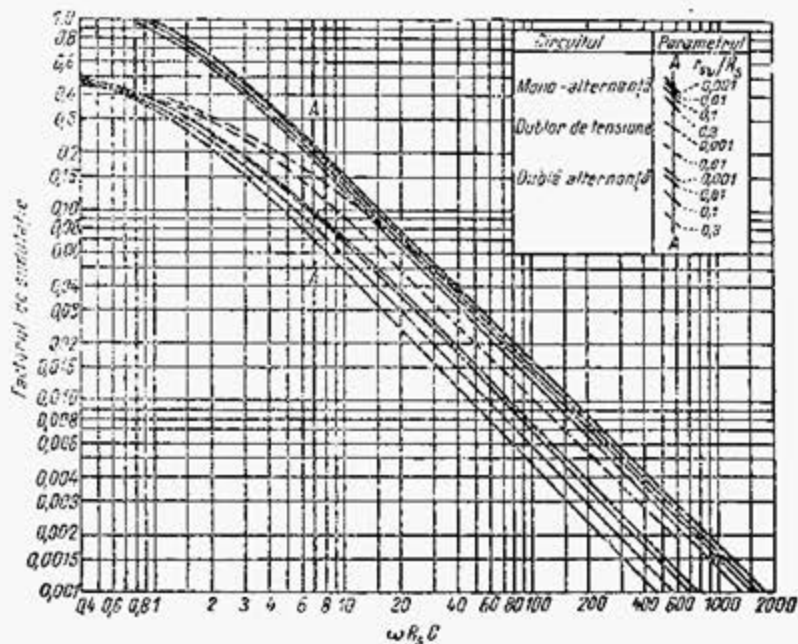


Fig. 113. — Diagramă pentru determinarea factorului de ondulație la redresoarele cu sarcină $R-C$.

Dacă se cunoaște caracteristica statică a tubului redresor, este preferabil să se obțină valori mai exacte în locul celor aproximative date mai sus.

β) *Tensiunea redresată.* În fig. 139 se arată curbele raportului dintre tensiunea medie redresată U_d și amplitudinea tensiunii de alimentare U_m pentru un redresor monofazat mono-alternanță cu filtrul $R-C$. Fig. 140 și 141 reprezintă curbe similare pentru redresorul monofazat dublă-alternanță și circuitul dublor de tensiune și dublă-alternanță. În fig. 142 se dau curbele raportului dintre valoarea eficace și valoarea de vîrf a curenților anodici și valoarea medie, iar în fig. 143, curbele factorului de ondulație. În fig. 139–143, prin R_s se înțelege rezistența de sarcină, ω este pulsația tensiunii de alimentare, $r_{sp} = R_{in} + r_s$ și $r_{sm} = R_{im} + r_s$, în care r_s este suma tuturor rezistențelor din circuit în serie cu fiecare anod, inclusiv rezistența de linie, rezistența bobinajelor și transformatorului și a eventualei rezistențe serie adăugată pentru a limita curentul de vîrf anodic.

Deoarece tensiunea redresată dorită se poate obține de obicei cu ușurință utilizînd un transformator de alimentare cu raport potrivit, este logic să se bazeze proiectarea redresorului pe factorul de ondulație permis și nu pe o valoare specificată pentru raportul $\frac{U_d}{U_m}$. Dacă nu se întrebuintează un transformator de alimen-

tare, ceea ce este cazul de obicei la dublorii de tensiune, este necesar să se mărească puțin valoarea lui C peste valoarea strict necesară pentru a da filtrajul cerut, aceasta pentru a putea obține tensiunea redresată cerută.

Pentru a asigura un bun reglaj de tensiune, parametrul $\omega R_s C$ la plină sarcină trebuie să cadă la dreapta cotului curbei corespunzătoare raportului

$$\frac{U_d}{U_m} \text{ din fig. 139, 140 sau 141.}$$

c) Redresoare cu sarcină inductivă ($R-L$ în serie)

55. Redresoarele cu kenotroane și gazotroane se pot utiliza deopotrivă în circuitele cu sarcină $R-L$ în serie.

α) *Circuitul mono-alternanță.* Dacă se pune în serie cu sarcina o inductanță, aceasta are un efect de filtraj asupra curentului redresat. Ea absoarbe energia magnetică atunci cînd curentul crește peste valoarea medie și cedează această energie circuitului atunci cînd curentul scade sub valoarea medie. O inductanță prezintă o impedanță mare față de componentele armonice ale curentului reducînd astfel amplitudinea lor față de componenta medie și contribuind astfel la micșorarea ondulației. În fig. 144 este reprezentat un redresor mono-alternanță cu sarcină $R-L$.

Ecuația circuitului. Neglijînd și aici rezistența tubului sau a elementului redresor, se poate scrie ecuația circuitului sub forma:

$$L \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = U_m \sin \omega t. \quad (55.1)$$

sau:

$$\frac{di_d}{dt} + \frac{R_s}{L} i_d = \frac{U_m}{L} \sin \omega t; \quad (55.2)$$

soluția regimului tranzitoriu este:

$$i_d = B e^{-\frac{R_s}{L} t}, \quad (55.3)$$

iar soluția regimului staționar este:

$$i_d = \frac{U_m}{R_s^2 + \omega^2 L^2} (R_s \sin \omega t - \omega L \cos \omega t), \quad (55.4)$$

care se mai poate scrie și sub forma:

$$i_d = \frac{U_m}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (55.5)$$

în care:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_s}. \quad (55.6)$$

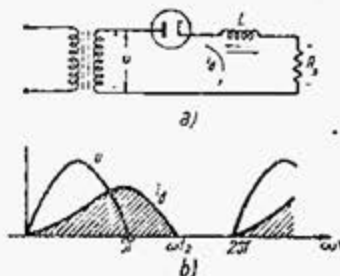


Fig. 144. — Circuit redresor mono-alternanță cu inductanță serie: a) — schema de principiu; b) — forma de undă a curentului și tensiunii.

Combinând soluțiile regimului tranzitoriu și staționar, se obține expresia definitivă a curentului:

$$i_d = \frac{U_m}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \varphi) + B e^{-\frac{R_s}{L} t} \quad (55.7)$$

Deoarece într-un circuit cu inductanță, curentul este totdeauna nul în momentul aplicării tensiunii, adică în acest caz în momentul când elementul redresor leagă sursa la sarcină ($\omega t = 0$), curentul i_d trebuie să fie nul, condiție din care se poate obține constanta de integrare B .

Expresia analitică a pulsului de curent redresat este deci:

$$i_d = \frac{U_m}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) + e^{-\frac{R_s}{L} t} \cdot \sin \varphi \right] \quad (55.8)$$

Circuitul este excitat de o serie de pulsuri de curent de această formă. Când inductanța crește, termenul exponențial scade mai încet și curentul curge mult timp după ce tensiunea de alimentare a trecut prin 0 la $\omega t = \pi$. În acest interval de timp, anodul elementului redresor primește o tensiune pozitivă din partea inductanței care se comportă ca un generator și cedează energia sa magnetică circuitului. La un redresor dublă-alternanță este posibil să se mențină curentul în circuit în permanență, curentul fiind dat în mod succesiv de cele două elemente redresoare. Această situație se va analiza la paragraful următor.

Unghiul de conducție. Dacă L nu este suficient de mare ca să mențină curentul în timpul întregii perioade, interesează să se determine unghiul de oprire a conducției ωt_2 . Deoarece curenți negativi nu pot exista prin elementul redresor, $i_d = 0$ la $\omega t = \omega t_2$.

Făcând înlocuirea în ecuația (55.8) se obține:

$$\sin(\omega t_2 - \varphi) + e^{-\frac{R_s \omega t_2}{L}} \cdot \sin \varphi = 0. \quad (55.9)$$

Dezvoltând această expresie și folosind valorile pentru sinus și cosinus din (55.6), ecuația (55.9) se poate pune sub forma:

$$R_s \sin \omega t_2 + \omega L \left(e^{-\frac{R_s \omega t_2}{L}} - \cos \omega t_2 \right) = 0,$$

sau:

$$\frac{\omega L}{R_s} = \frac{\sin \omega t_2}{\cos \omega t_2 - e^{-\frac{R_s \omega t_2}{L}}} \quad (55.10)$$

Aceasta este o ecuație transcendentă care poate fi rezolvată pe cale grafică. În fig. 145, s-a reprezentat variația unghiului de conducție ωt_2 în funcție de

parametrul $\frac{\omega L}{R_s}$. Această curbă arată prelungirea unghiului de conducție când inductanța crește. În fig. 146 s-au arătat formele de undă ale pulsului de curent

pentru diferite valori $\frac{\omega L}{R_s}$ în care se presupune $R_s = \text{constant}$.

Curentul mediu redresat se obține din ecuația (55.8) prin luarea mediei:

$$I_d = \frac{U_m}{2\pi \sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} \int_0^{\omega t_2} \left(\sin(\omega t - \varphi) + e^{-\frac{R_s \omega t}{L}} \cdot \sin \varphi \right) d(\omega t). \quad (55.11)$$

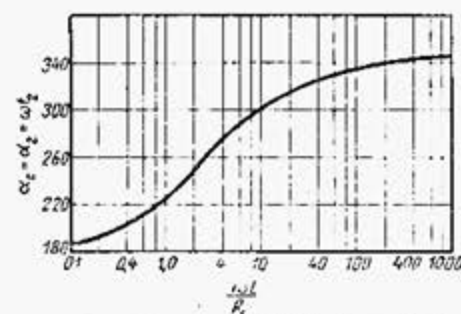


Fig. 145. — Variația unghiului de conducție ωt_2 cu $\frac{\omega L}{R_s}$ la un circuit redresor mono-alternanță cu inductanță serie.

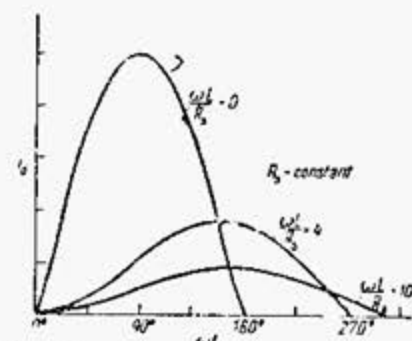


Fig. 146. — Efectele variației inductanței asupra formei de undă a curentului într-un redresor mono-alternanță cu inductanță serie ($R_s = \text{constant}$).

După integrare și simplificare se obține:

$$I_d = \frac{U_m}{2\pi R_s} (1 - \cos \omega t_2). \quad (55.12)$$

Tensiunea medie redresată este:

$$U_d = \frac{U_m}{2\pi} (1 - \cos \omega t_2). \quad (55.13)$$

În fig. 147 s-a reprezentat variația raportului $\frac{U_d}{U_m}$ în funcție de inversul parametrului $\frac{\omega L}{R_s}$, adică $\frac{R_s}{\omega L}$, pentru a ușura o comparație a acestei curbe cu curbele date pentru filtrul cu capacitate în funcție de $\omega R_s C$.

Trebuie observat că deoarece curba este trasată în funcție de $\frac{R_s}{\omega L}$, valori mici ale lui $\frac{R_s}{\omega L}$ reprezintă sarcini mari, iar valori mari ale lui $\frac{R_s}{\omega L}$, sarcini mici. Se vede că tensiune mare se obține la sarcini mici. De asemenea se constată că tensiunile medii redresate sînt mult mai mici la un circuit cu sarcină inductivă decît la circuitul cu sarcină capacitivă pentru aceeași tensiune de alimentare U_m .

Forma curentului redresat. Din curbele date în fig. 146 se vede că la circuitul cu sarcină inductivă nu se obțin vârfuri de curent mari. Prezența inductanței împiedică variații rapide ale curentului, iar pentru valori mari ωL , vârful pulsului de curent se reduce la o valoare cu puțin mai mare decât valoarea medie.

Factorul de ondulație al curentului și tensiunii la rezistența de sarcină se poate obține calculând valoarea eficace a curentului sau a tensiunii aplicând formula de definiție a factorului de ondulație.

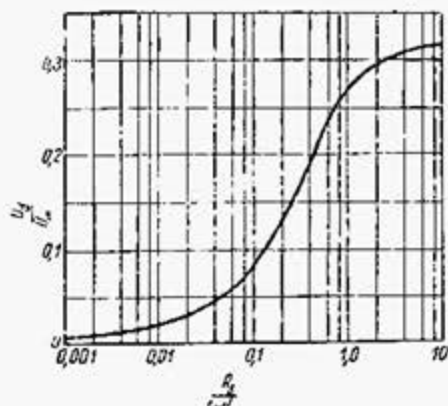


Fig. 147. — Variația raportului $\frac{U_d}{U_m}$ cu $\frac{R_s}{\omega L}$ la un redresor mono-alternanță cu inductanță serie.

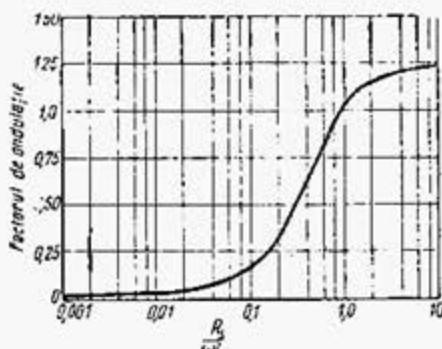


Fig. 148. — Variația factorului de ondulație cu $\frac{R_s}{\omega L}$ la un circuit redresor mono-alternanță cu inductanță serie.

În fig. 148, s-a trasat factorul de ondulație în funcție de $\frac{R_s}{\omega L}$. Ondulația

cea mai mare se întâmplă la sarcini mici adică pentru $\frac{R_s}{\omega L}$ mare. Se observă că la

acest circuit efectul sarcinii este exact opus decât în cazul circuitului cu sarcină capacitivă la care s-a văzut că ondulația maximă se produce la sarcină mare.

Comparație între filtrul $R-C$ și filtrul $R-L$. Filtrul cu condensator ($R-C$) produce o tensiune continuă mai mare decât filtrul cu inductanță ($R-L$) cu inconvenientul unui curent de vîrf mare și al unei variații de tensiune mai mari de la mersul în gol (R_s mare) la sarcina plină (R_s mic), adică nu are un reglaj de tensiune bun. Filtrul cu inductanță serie reduce curentul de vîrf, are un reglaj de tensiune mai bun, însă necesită o tensiune de alimentare mai mare. Ambele circuite nu realizează o ondulație acceptabilă în cazul aplicațiilor de curenți slabi, afară numai dacă se utilizează condensatoare sau inductanțe de valori exagerate.

Diagrame generalizate. Se poate da și aici o diagramă generalizată similară cu aceea din fig. 136 a și b.

Din expresiile (55.12) și (55.13) de mai sus rezultă:

$$\frac{U_d}{U_m} = I_d \frac{R_s}{U_m} = \frac{1}{2\pi} (1 - \cos \alpha_c) \quad (55.14)$$

în care $\alpha_c = \omega_0 t_2$ este unghiul de conducție a curentului prin redresor.

În fig. 149 este reprezentată curba corespunzătoare expresiei (55.14) luând în abscise unghiul $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_s}$ al impedanței de sarcină, care este legat de unghiul de conducție α_c prin relația (55.10), reprezentată în fig. 145. Comparînd diagrama din fig. 149 cu cea din fig. 136 a și b se observă că, indiferent de felul elementului de filtraj sau netezire (capacitate sau inductanță), o creștere a unghiului de conducție este urmată de o scădere a curentului de sarcină I_d , dacă se variază numai elementul de filtraj corespunzător.

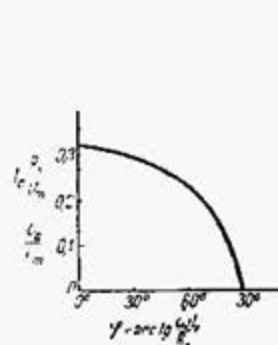


Fig. 149. — Diagramă generalizată care arată dependența componentei continue a curentului de sarcină de $\frac{\omega L}{R_s}$.

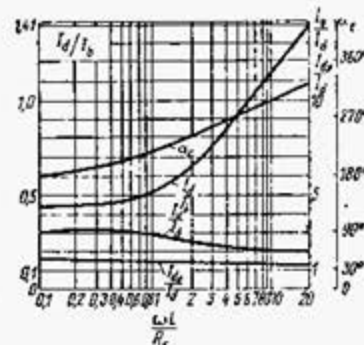


Fig. 150. — Variația curentilor și a unghiului de conducție cu $\frac{\omega L}{R_s}$ la un redresor mono-alternanță.

În fig. 150 sînt reunite diagramele de variație a principalelor mărimi din funcționarea redresorului: α_c = unghiul de conducție, $\frac{I_d}{I_b}$ = raportul dintre curentul

de vîrf și curentul mediu redresat, $\frac{I_d}{I_m}$ = raportul dintre valoarea eficace și valoarea medie a curentului redresat, $\frac{I_d}{I_b}$ = raportul dintre curentul mediu redresat

și curentul de bază, $I_b = \frac{U}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}}$ = valoarea eficace a curentului care s-ar produce în circuit dacă tensiunea de alimentare s-ar aplica fără intercalarea elementului redresor.

3) Circuit dublu-alternanță. Pentru redresarea ambelor alternanțe se folosește un transformator cu priză mediană (fig. 151a). În acest caz forma de undă a curentului este dată în fig. 151b. Pentru cazul unei scheme în punte (fig. 151c), forma curentului este dată în fig. 151d.

Curenții i_{a1} și i_{a2} , însumindu-se în sarcină, dau curentul redresat i_d . Ca și în schema de redresare a unei singure alternanțe, curentul redresat nu scade pînă la zero, la sfîrșitul alternanței pozitive. La momentul $\omega t = \pi$, curentul trece instantaneu de la un element redresor la altul datorită faptului că tensiunea

aplicată primului element redresor devine negativă, în timp ce tensiunea aplicată celui de al doilea element redresor devine pozitivă. Nimic nu se opune trecerii instantanee a curentului de la o înfășurare secundară a transformatorului la alta, dacă se consideră un transformator ideal, caracterizat prin lipsa rezistențelor înfășurărilor și a reactanțelor de scăpări.

Procesul de comutație a curentului, la momentul $\omega t = \pi$ de la o înfășurare secundară la alta, constituie deosebirea fundamentală a funcționării acestui circuit față de circuitul mono-alternanță.

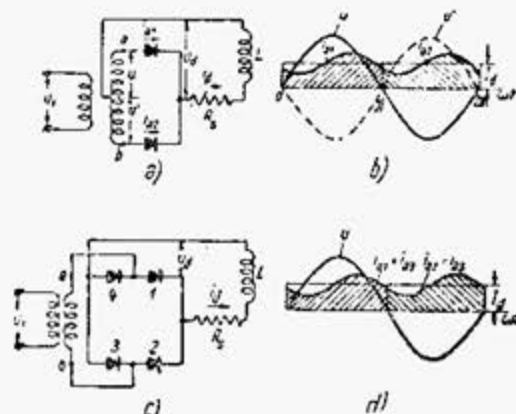


Fig. 151. — Redresarea ambelor alternanțe în cazul unei sarcini cu rezistență și inductanță: a — schemă de principiu cu priză mediană; b — curentul și tensiunea din înfășurările secundare; c — schemă în punte; d — tensiunea din înfășurarea secundară și curentul din elementele redresoare.

Expresia analitică a pulsului de curent redresat. Ecuația (55.7) rămâne valabilă și pentru circuitul dublă-alternanță. Nu se schimbă decât condițiile inițiale în funcție de care se determină constanta de integrare B , care reprezintă valoarea inițială a curentului în regim tranzitoriu sau liber. Pentru determinarea constantei B se poate folosi condiția de egalitate a valorilor curentului redresat, la începutul și la sfârșitul fiecărei semiperioade:

$$i_d(0) = i_d(\pi), \quad (55.15)$$

din care se obține ecuația:

$$-\frac{U_m}{R_s^2 + \omega^2 L^2} \sin \varphi + B = \frac{U_m}{R_s^2 + \omega^2 L^2} \sin \varphi + B e^{-\frac{R_s}{\omega L} \pi}. \quad (55.16)$$

Determinând pe B din (55.16) și înlocuind în ecuația (55.7) se obține:

$$i_d = \frac{U_m}{R_s^2 + \omega^2 L^2} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \frac{2 \sin \varphi}{1 - e^{-\frac{R_s}{\omega L} \pi}} e^{-\frac{R_s}{\omega L} \omega t} \right] = \frac{U_m \cos \varphi}{R} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \frac{2 \sin \varphi}{1 - e^{-\frac{R_s}{\omega L} \pi}} e^{-\frac{R_s}{\omega L} \omega t} \right]. \quad (55.17)$$

Această expresie este valabilă numai în intervalul de la 0 la π , dar variația curentului se repetă în mod identic de la π la 2π etc.

Efectul inductanței asupra undulației. Valoarea instantanee a curentului redresat calculată din expresia (55.17), raportată la curentul maxim:

$$I_{dm} = \frac{U_m}{R_s}, \quad (55.18)$$

este dată de curbele din fig. 152, care au ca parametru valoarea $\frac{\omega L}{R_s} = \tan \varphi$.

Din curbele reprezentate în fig. 152 se vede că odată cu creșterea inductanței, undulația curentului redresat scade mult.

d) Redresoare cu forță contraelectromotoare în circuitul de sarcină

56. Moduri de limitare a curentului. Din categoria sarcinilor cu f.c.e.m. fac parte acumulatorii, motoarele de curent continuu, băile de electroliză etc. La o astfel de sarcină curentul redresat circulă sub acțiunea diferenței dintre tensiunea de ieșire U_d (determinată de tensiunea de alimentare U) și f.c.e.m. E .

În anumite cazuri, limitarea curentului se realizează cu ajutorul rezistenței de sarcină propriu-zise, cu ajutorul rezistențelor interne ale elementelor redresoare, ale rezistențelor și reactanțelor înfășurărilor secundare ale transformatorului de alimentare sau, mai des, prin introducerea de rezistențe adiționale sau de reactanțe în circuitul anodic (pe anodul elementului redresor) sau în circuitul catodic (pe catodul elementului redresor).

În cele ce urmează se va examina funcționarea redresorului, în cazul când curentul este limitat de o rezistență, sau de o reacțanță, fără a separa rezistența proprie a circuitului de rezistența adițională.

a) Limitarea curentului cu ajutorul unei rezistențe. În fig. 153a, este reprezentat un circuit redresor dublă-alternanță având în circuitul de sarcină o rezistență R_s și o f.c.e.m. E . Formele de undă ale curentului și tensiunii care ilustrează funcționarea acestui circuit sînt reprezentate în fig. 153 b — e. Deoarece curentul redresat este întrerupt, funcționarea fiecărei înfășurări secundare a transformatorului de alimentare poate fi considerată separat, ceea ce face ca acest circuit să fie echivalent cu două circuite redresoare mono-alternanță cu sarcină comună. Regimul intermitent

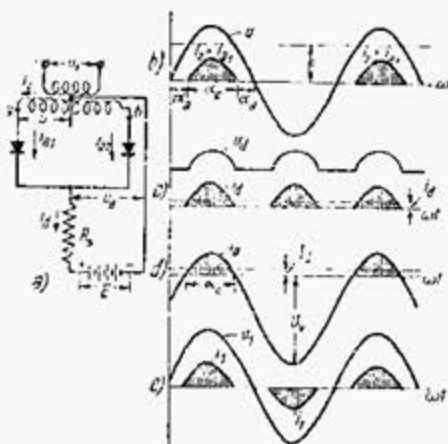


Fig. 153. — Circuit redresor dublă alternanță cu sarcină rezistivă și forță contraelectromotoare:

a — schemă de principiu; b — tensiunea pe o fază secundară și curentul într-un element redresor; c — tensiunea redresată și curentul redresat; d — curentul redresat și tensiunea inversă pe un element redresor; e — curentul și tensiunea primară.

se datorește faptului că curentul din circuitul de redresare poate circula numai în porțiunea de perioadă în care tensiunea de alimentare este mai mare decât f.c.e.m.

Conducția curentului prin elementul redresor apare la momentul corespunzător unghiului α_a care se determină din relația:

$$\sin \alpha_a = \frac{E}{U_m} \quad (56.1)$$

Valoarea instantanee a curentului este:

$$i_a = i_2 = \frac{u E}{R_s} \quad (56.2)$$

Unghiul de conducție. La momentul determinat de unghiul:

$$\alpha_a + \alpha_c = \pi - \alpha_a \quad (56.3)$$

conducția încetează. Durata totală de conducție a redresorului corespunde unghiului:

$$\alpha_c = \pi - 2\alpha_a \quad (56.4)$$

Din relația (56.4) rezultă:

$$\cos \frac{\alpha_c}{2} = \sin \alpha_a \quad (56.5)$$

Relațiile (56.1), (56.2) și (56.4) arată că, o dată cu variația valorii relative $\frac{E}{U_m}$ variază și momentul de intrare în funcțiune a redresorului (α_a), valorile instantanee ale curentului, durata totală de funcționare a redresorului (α_c) și, deci, și valorile medii ale curenților care circulă prin redresor și sarcină.

Valoarea medie a curentului printr-un element redresor este determinată de integrala:

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\alpha_c}{2}}^{\frac{\alpha_c}{2}} \frac{U_m}{R_s} \left(\cos \omega t - \cos \frac{\alpha_c}{2} \right) d(\omega t), \quad (56.6)$$

a cărei rezolvare, dacă se ține seama de (56.1) și (56.5), dă:

$$I_a = \frac{E}{\pi R_s} \cdot \frac{\sin \frac{\alpha_c}{2} - \frac{\alpha_c}{2} \cos \frac{\alpha_c}{2}}{\cos \frac{\alpha_c}{2}} \quad (56.7)$$

Dacă se împarte și se înmulțește (56.7) cu $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, se obține:

$$I_a = \frac{E}{U} \cdot \frac{U}{R_s} \cdot \frac{\sin \frac{\alpha_c}{2} - \frac{\alpha_c}{2} \cos \frac{\alpha_c}{2}}{\pi \cos \frac{\alpha_c}{2}} \quad (56.8)$$

Luând $\frac{U}{R_s} = I_b$ drept un curent de bază sau de referință (valoarea eficace a curentului care s-ar produce dacă tensiunea de alimentare s-ar aplica direct sarcinii R_s) se pot calcula după (56.8) valorile $\frac{I_a}{I_b}$; acestea sînt date în funcție de $\frac{E}{U}$ în fig. 154 (curba 1). Pe această curbă s-au marcat prin puncte valorile unghiurilor α_a . Aceeași curbă reprezintă și valoarea medie a curentului redresat, în cazul unui circuit redresor mono-alternanță.

Curentul mediu redresat. În cazul unui circuit redresor dublă-alternanță, curentul redresat este dublul curentului mediu care circulă printr-un element redresor, astfel:

$$I_d = 2I_a \quad (56.9)$$

Curentul de vîrf printr-un element redresor este:

$$I_v = \frac{U_m - E}{R_s} = \frac{U_m (1 - \sin \alpha_a)}{R_s} \quad (56.10)$$

sau cu relația (56.5):

$$I_v = \frac{\sqrt{2} \left(1 - \cos \frac{\alpha_c}{2} \right) U}{R_s} \quad (56.11)$$

Raportul dintre curentul de vîrf și curentul mediu printr-un element redresor, este dat de curba 2 din fig. 154 (scara valorilor relative $\frac{I_v}{I_a}$ este în dreapta diagramei).

Curba 3 din fig. 152, dă, în unități relative, valoarea eficace a curentului înfășurării secundare a transformatorului, calculată din relația:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\alpha_c}{2}}^{\frac{\alpha_c}{2}} \left[\frac{\sqrt{2} U}{R_s} \left(\cos \omega t - \cos \frac{\alpha_c}{2} \right) \right]^2 d(\omega t)} \quad (56.12)$$

Forma de undă a tensiunii redresate U_d depinde de locul în care se introduce rezistența limitatoare de curent: în circuitul anodic sau în circuitul catodic.

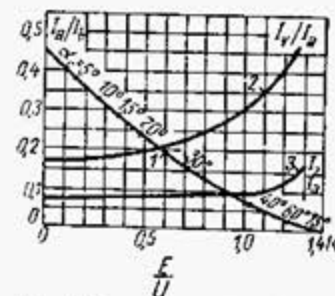


Fig. 154. - Caracteristicile unui circuit redresor dublă alternanță cu sarcină rezistivă și forță contraelectromotoare:

1 - $\frac{I_a}{I_b}$; 2 - $\frac{I_v}{I_a}$; 3 - $\frac{I_2}{I_a}$

Dacă se introduce R_s în circuitul catodic, tensiunea redresată are forma din fig. 153c și este compusă din segmente de drepte paralele cu axa absciselor și vîrfuri de sinusoidă. În acest caz tensiunea medie U_d se determină din relația:

$$U_d = E + I_d R_s. \quad (56.13)$$

Dacă rezistența R_s se introduce în circuitul anodic, sau dacă rolul de rezistență limitatoare de curent îl are numai rezistența internă a elementelor redresoare, atunci tensiunea medie redresată este:

$$U_d \approx E. \quad (56.14)$$

Tensiunea inversă de vîrf. Dacă R_s este introdus în circuitul catodic, valoarea de vîrf a tensiunii inverse U_v în circuitul redresor dublă-alternanță este:

$$2U_m = 2\sqrt{2} U, \quad (56.15)$$

ca în cazul unei sarcini cu rezistență fără f.c.e.m. Dacă R_s este introdus în circuitul anodic, U_v capătă o valoare puțin mai mică, și anume:

$$U_v = \sqrt{2} U + E. \quad (56.16)$$

Formula (56.16) este valabilă și pentru circuitul redresor mono-alternanță.
 * β) **Limitarea curentului cu ajutorul unei inductanțe.** Utilizarea rezistenței pentru limitarea intensității curentului duce la pierderi de putere activă în interiorul circuitului de redresare, ceea ce reduce randamentul. De aceea, în majoritatea cazurilor, se preferă limitarea intensității curentului cu ajutorul unei inductanțe.

În cele ce urmează se va examina circuitul redresor mono-alternanță, concluziile obținute se vor extinde și asupra circuitului dublă-alternanță.

Redresarea unei singure alternanțe. Circuitul redresor mono-alternanță cu limitarea curentului printr-o inductanță, este reprezentat în fig. 155. Inductanța este introdusă înainte redresorului (inductanță anodică). Introducerea inductanței după redresor (inductanță catodică) influențează numai forma curbei tensiunii redresate.

Funcționarea este redată de diagramele din fig. 155 b-d. În diagrama din fig. 155b se compară curba tensiunii alternative din secundarul transformatorului u , cu dreapta E care reprezintă f.c.e.m. În porțiunea de perioadă în care u este mai mare decât E , curentul i_a , a cărui curbă este reprezentată în fig. 155c, crește ajungînd la maximum în momentul cînd sinusoida u se intersectează cu dreapta E , după care curentul i_a scade, atîngînd valoarea zero în momentul corespunzător unghiului $\alpha_a + \alpha_c$; α_c este unghiul de conducție, iar α_a unghiul de începere a conducției.

Cînd tensiunea de alimentare u devine mai mică decât E , curgerea curentului i_a în circuit se datorește inductanței L , care, cedînd energia sa magnetică în circuit, joacă rolul de sursă de energie. Prelungirea conducției este cu atît mai mare cît L este mai mare.

Expresia analitică a pulsului de curent redresat. Variațiile valorilor instantanee ale curentului i_a pot fi ușor determinate atît analitic, cît și grafic, folosind metoda suprapunerii efectelor, adică considerînd independent acțiunea celor două surse, în circuitul de redresare: tensiunea variabilă u și f.c.e.m. E .

Prima produce în circuit curentul i' determinat de ecuația:

$$\omega L \frac{di'}{d(\omega t)} = U_m \sin \omega t. \quad (56.17)$$

A doua produce în circuit curentul i'' , care crește cu o viteză constantă și este determinat de ecuația:

$$\omega L \frac{di''}{d(\omega t)} = E. \quad (56.18)$$

Rezolvarea ecuației (56.17), ținînd seama de faptul că în momentul corespunzător unghiului α_a curentul i' este nul, dă:

$$i' = \frac{U_m}{\omega L} (-\cos \omega t + \cos \alpha_a), \quad (56.19)$$

iar rezolvarea ecuației (56.18) ținînd seama de aceeași condiție inițială dă:

$$i'' = \frac{E}{\omega L} (\omega t - \alpha_a). \quad (56.20)$$

Curentul i' este reprezentat de curba din fig. 155d. Ordonatele raportate la axa cosinusoidalei din figură reprezintă componenta regimului staționar sau forțat, iar mărimea $\left(\frac{U_m}{\omega L} \cos \alpha_a\right)$ este componenta regimului tranzitoriu sau liber, care are o valoare constantă, pentru că în circuit nu se consideră nici o rezistență. Ordonatele raportate la axa ωt reprezintă curentul total i' produs de sursa u .

Curentul i'' este reprezentat de o dreaptă cu panta $\tan \beta = \frac{E}{\omega L}$.

Curenții i' și i'' au același moment inițial α_a și sensuri diferite în circuit. Curentul rezultant în intervalul de conducție α_c este:

$$i_a = i' - i'' = \frac{U_m}{\omega L} (-\cos \omega t + \cos \alpha_a) - \frac{E}{\omega L} (\omega t - \alpha_a). \quad (56.21)$$

Metodă grafică pentru determinarea pulsului de curent. Curentul i_a este reprezentat în fig. 155d de segmentele mărginite de curbele i' și i'' (suprafața hașurată). Curba curentului din fig. 155c s-a obținut după ordonatele acestei suprafețe hașurate.

Utilizarea metodei grafice de construire a curbei curentului redresat ($i_a = i_d$ în cazul circuitului din fig. 155a) este avantajoasă mai ales cînd E variază. Această metodă este aplicată în fig. 155e pentru patru valori E , din care una este $E = 0$.

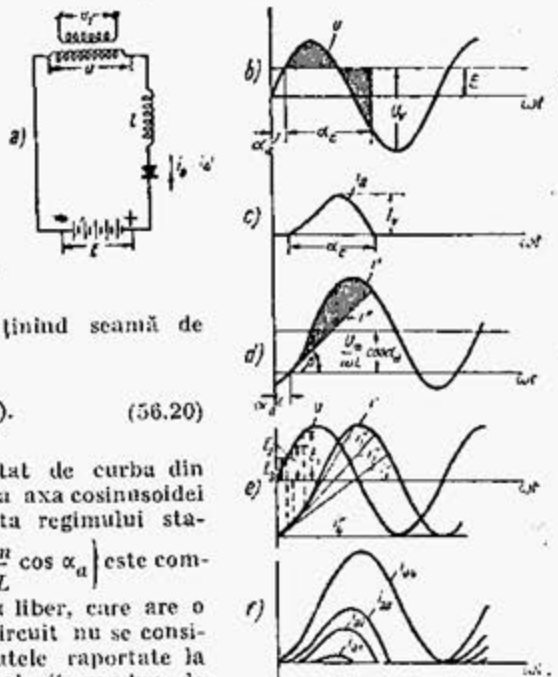


Fig. 155. - Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină inductivă și forță contraelectromotoare: a - schema de principiu; b - forma de undă a tensiunii secundare și forța contraelectromotoare; c - curentul redresat; d - construcție grafică pentru determinarea formei curentului redresat; e - construirea formei curentului redresat pentru diferite forțe contraelectromotoare; f - curenți redresați la diferite forțe contraelectromotoare.

Cînd E variază, unghiul α_a și β variază. Curbele obținute pentru I_a sînt transpuse în fig. 155f. Se remarcă forma particulară a curentului i_{a4} , care se produce pentru $E = 0$ și $\alpha_a = 0$ și care coincide în întregime cu curentul i' de mai sus.

Curentul mediu redresat se obține integrînd expresia (56.21):

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_a + \alpha_c} i_a d(\omega t) = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_a + \alpha_c} \left[\frac{U_m}{L\omega} (-\cos \omega t + \cos \alpha_a) - \frac{E}{\omega L} (\omega t - \alpha_a) \right] d(\omega t). \quad (56.22)$$

Pentru efectuarea integralei este necesar să se cunoască unghiul de conducție α_c care depinde de raportul $\frac{E}{U_m}$.

Unghiul de conducție. Unghiul α_c poate fi calculat cu ajutorul integralei:

$$\int_{\alpha_a}^{\alpha_a + \alpha_c} (U_m \sin \omega t - E) d(\omega t) = 0, \quad (56.23)$$

care exprimă condiția ca valoarea medie a tensiunii la bornele inductanței să rămîină nulă în timpul funcționării redresorului, dat fiind că bilanțul energetic în inductanță este nul. Referindu-ne la fig. 155b, aceasta înseamnă că suprafața hașurată pozitivă proporțională cu valoarea fluxului magnetic din inductanță, în cursul creșterii curentului, trebuie să fie egală cu suprafața hașurată negativă, care corespunde fluxului magnetic în timpul descreșterii curentului.

În fig. 156 s-a reprezentat variația unghiului de conducție α_c cu raportul E/U ; pe curbă s-au însemnat valorile corespunzătoare ale unghiului α_a de începere a conducției.

Variația curenților cu f.c.e.m. În fig. 157 s-a reprezentat variația curentului mediu redresat I_d (v. fig. 155a), raportat la un curent de

bază $I_b = \frac{U}{\omega L}$ (valoarea eficace a curentului care se produce dacă tensiunea U s-ar aplica direct inductanței L).

Forma curbei 1 arată că, pentru o valoare constantă a lui U , creșterea lui E duce la scăderea valorii relative a curentului mediu redresat.

Curba 2 din fig. 157 reprezintă raportul dintre valoarea de vîrf a curentului redresat și valoarea medie, iar curba 3 raportul dintre valoarea eficace a curentului I_2 din înfășurarea secundară a transformatorului și valoarea medie a curentului redresat (v. fig. 155a).

Forma curbei 2 arată că, pe măsura creșterii lui E , redresorul trebuie să suporte un curent de vîrf, din ce în ce mai mare față de curentul mediu. Curentul, în loc să fie de 3,14 ori mai mare, ca în cazul circuitului mono-alternanță cu sarcină pur rezistivă, poate fi aici de 10 ori mai mare sau mai mult.

Creșterea raportului $\frac{I_2}{I_d}$ arată că pierderea prin încălzirea înfășurării străbătute de curentul I_2 crește mai repede decît puterea utilă dezvoltată de curentul I_d în circuitul de sarcină.

Puterea redresată este puterea absorbită de receptorul cu f.c.e.m. E :

$$P_d = EI_d. \quad (56.24)$$

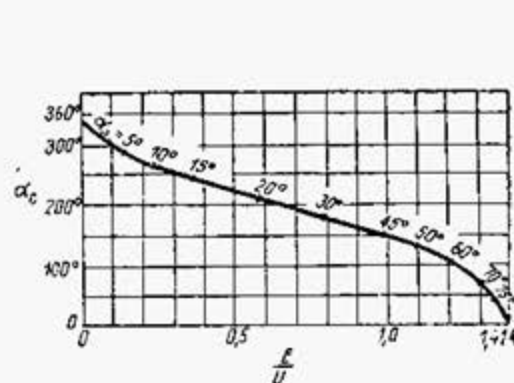


Fig. 156. — Unghiul de conducție a curentului redresat din circuitul din fig. 155, în funcție de valoarea relativă a forței contraelectromotoare.

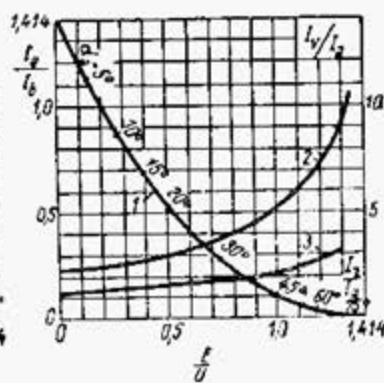


Fig. 157. — Caracteristicile de funcționare ale circuitului redresor din fig. 155:

$$1 - \frac{I_d}{I_{d0}}; \quad 2 - \frac{I_2}{I_{20}}; \quad 3 - \frac{I_1}{I_{10}}$$

Se obișnuiește să se raporteze această putere la o putere de bază. Se ia drept putere de bază puterea reactivă absorbită de inductanța din circuit cînd ar fi legată direct la bornele transformatorului:

$$P_b = \frac{U^2}{\omega L}. \quad (56.25)$$

Variația puterii cu f.c.e.m. Folosind curba 1 din fig. 157 se poate obține variația raportului $\frac{P_d}{P_b}$ dată de curba 1 din fig. 158.

Raportul $\frac{P_d}{P_b}$ trece prin maximum pentru

$\frac{E}{U} = 0,5$, dar aceasta nu înseamnă că pentru $\frac{E}{U} = 0,5$ s-a obținut utilizarea cea mai eficace a circuitului redresor. Factorul de utilizare al

transformatorului $\frac{P_d}{P_2}$ arată în ce măsură puterea aparentă a transformatorului ($P_2 = UI_2$) s-a folosit pentru a obține puterea redresată P_d . Curba 2 din fig. 158 arată că utilizarea optimă a transformatorului se obține pentru $\frac{E}{U} = 1,05$.

Puterea de calcul a bobinei P_L este dată de:

$$P_L = \frac{1}{2} U_L I_2. \quad (56.26)$$

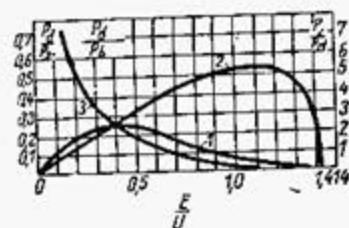


Fig. 158. — Variația puterilor în circuitul redresor din fig. 155:

$$1 - \frac{P_d}{P_b}; \quad 2 - \frac{P_d}{P_2}; \quad 3 - \frac{P_2}{P_b}$$

În care U_L este valoarea eficace a tensiunii la bornele bobinei. Ea se determină din:

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_a + \alpha_c} (u - E)^2 d(\omega t)}. \quad (56.27)$$

Se poate considera însă, cu aproximație că:

$$U_L = \frac{I_D}{2} \omega L. \quad (56.28)$$

Coeficientul $1/2$ din formula (56.26) se ia avînd în vedere faptul că puterea de calcul a bobinei se raportează la puterea de calcul a transformatorului, care are două înfășurări în loc de o singură înfășurare cum are bobina.

Valoarea raportului $\frac{P_L}{P_d}$ este dată de curba 3 din fig. 158. Scara pentru

această curbă este dată în dreapta diagramei, iar pentru $\frac{P_d}{P_b}$ și $\frac{P_d}{P_2}$ în stînga diagramei.

Curbele din fig. 157 și 158 dau o imagine completă a modului de variație a curentului și puterii în cazul unui circuit redresor mono-alternanță cu o f.c.e.m. în serie cu o inductanță. Ele permit să se aleagă, în funcție de datele cazului de aplicație, valoarea optimă corespunzătoare $\frac{E}{U}$.

Forma de undă a tensiunii redresate depinde de locul unde se află inductanța. Cînd inductanța este în circuitul anodic, valoarea instantanee a tensiunii redresate este constantă și egală cu E . Cînd inductanța este în circuitul catodic, forma de undă a tensiunii redresate se compune, cum rezultă din fig. 155b din porțiunea sinusoidale u limitată la timpul de conducție α_c și din segmente de dreaptă paralele cu axa absciselor la ordonata E , cînd redresorul este blocat.

Tensiunea inversă de vîrf rezultă din fig. 155b:

$$U_p = U_m + E = \sqrt{2} U + E. \quad (56.29)$$

Redresarea ambelor alternanțe. Cînd bobinele limitatoare de curent se introduc în circuitele anodice, circuitul redresor dublă alternanță cu priză mediană (fig. 159) se poate considera că este constituit din două circuite redresoare mono-alternanță (presupunînd că nu există un cuplaj inductiv între înfășurări prin intermediul unui flux de scăpări), independent de unghiul de conducție al curentului fiecărei faze. Cînd unghiul de conducție este mai mare decît 180° , cum se vede din fig. 159 curbele curenților se suprapun. Curentul redresat i_d pe porțiunea de funcționare independentă a fiecărui element redresor, repetă forma curenților i_{a1} și i_{a2} , iar pe porțiunea de suprapunere este egal cu suma acestor curenți. Calculul circuitului cu priză mediană se poate face folosind relațiile de mai sus pentru circuitul redresor mono-alternanță.

În acest caz valoarea medie a curentului redresat este egală cu dublul valorii medii a curentului din fiecare element redresor, dată de curba 1 din fig. 157.

Forma de undă a curentului primar poate fi obținută ca diferența curenților din fiecare element redresor.

În cazul circuitului în punte (fig. 160 a), valoarea limită a unghiului de conducție al curenților anodici nu poate depăși 180° . Cît timp valoarea unghiului de conducție al curentului redresorului, calculată pe baza relației (56.23), rămîne mai mică sau egală cu 180° , unghiurile de intrare în funcțiune a redresoarelor α_{c2} se determină, ca și înainte

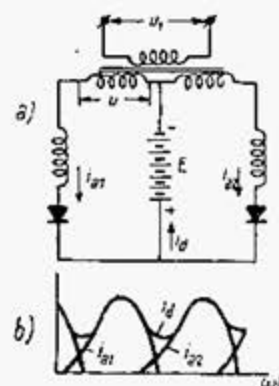


Fig. 159. — Circuit redresor dublă-alternanță cu inductanță în circuitul anodic și forță contraelectromotoare în circuitul de sarcină: a — schema de principiu; b — curenți din elementele redresoare și curentul redresat în sarcină.

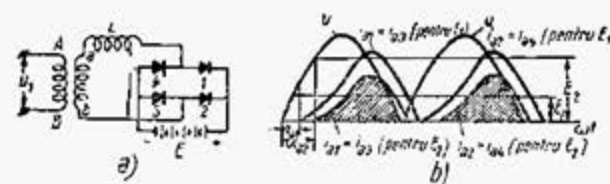


Fig. 160. — Circuit redresor dublă-alternanță în punte, cu inductanță în circuitul anodic și forță contraelectromotoare în circuitul de sarcină:

a — schema de principiu; b — forma de undă a tensiunii și curenților pentru două valori ale forței contraelectromotoare.

(de exemplu pentru E_2 din fig. 160) prin punctele de intersecție ale dreptei E_2 cu tensiunea alternativă u .

Pentru valori ale unghiurilor de conducție mai mari decît 180° , care corespund unor valori mici ale lui E , unghiul real de intrare în funcțiune a redresoarelor nu mai este determinat de intersecția dintre dreapta E și sinusoida u ci se stabilește automat cum arată curba curentului, care corespunde lui E_1 în fig. 160, adică unghiul de conducție al curentului redresat rămîne la 180° .

Unghiul real de intrare în funcțiune α_{c1} poate fi obținut din integrala (56.23), punînd $\alpha_c = 180^\circ$.

c) Redresor dublă-alternanță cu filtru L-C

57. Tipuri de filtre L-C. a) *Necesitatea filtrului L-C.* La examinarea circuitului redresor mono-alternanță cu sarcina R-C s-a văzut că tensiunea de undulație scade pentru un anumit curent de sarcină, pe măsură ce valoarea condensatorului crește. O dată cu aceasta însă valorile eficace și valoarea de vîrf a curentului prin tubul redresor cresc și, dacă tubul este de tipul gazotron și sursa de alimentare are o impedanță mică, curenții de vîrf pot lua valori foarte mari. Încît catodul tubului se poate distruge prin bombardamentul ionilor pozitivi, afară numai dacă nu se întrebunțează mijloace potrivite pentru a menține curenții de vîrf în limite acceptabile. O dată cu creșterea valorii eficace a curentului prin tub, produsă de creșterea capacității, se produce și o creștere a factorului de formă a formei de undă a curentului redresat. Din acest motiv crește încălzirea bobinajelor transformatorului sau a circuitului folosit pentru a furniza puterea necesară

redresorului. Din aceasta rezultă o scădere a randamentului și capacității redresorului de a furniza un anumit curent continuu.

La examinarea circuitului mono-alternanță cu sarcina $R-L$ s-a văzut că efectul inductanței este de a reduce valoarea de vîrf și valoarea eficace a curentului redresat pentru un curent mediu dat, reducînd în același timp și ondulația. Prin urmare, efectul inductanței este exact opus efectului capacității, însă utilizarea inductanței serie are dezavantajul scăderii tensiunii redresate și a valorii medii a curentului pentru o tensiune de alimentare dată.

Cînd se întrebuințează numai capacitatea sau numai inductanța într-un filtru, la un redresor mono-alternanță, este necesar de obicei să se utilizeze valori de capacități și inductanțe, care adesea sînt foarte mari.

La astfel de valori mari apar curenți de vîrf exagerați în cazul circuitului cu condensator sau se obține o tensiune redresată foarte scăzută în cazul circuitului mono-alternanță cu inductanță. În consecință, la redresoare de putere mică și medie (redresoare în care curentul mediu este cuprins între 100–500 mA și tensiunea 100–1 000 V) a căror tensiune redresată trebuie să fie netedă, este necesar să se utilizeze un circuit dublă-alternanță și un filtru compus din inductanță și capacități.

β) *Comparație între filtrul cu intrare pe condensator sau pe inductanță.* În aplicațiile industriale nu se cer de obicei filtre de tensiuni mai mari de 1 000 V sau curenți mai mari de 0,5 A, deoarece utilizarea principală a filtrelor este în domeniul aparatelor electrice de măsură și de control în care tensiunea și curenții au valori relativ mici. Creșterea prețului filtrului pentru tensiuni și curenți mari este mai mult decît proporțională cu creșterea datelor nominale. Pentru acest motiv, este necesar să se studieze în detaliu condițiile de funcționare ale redresorului cînd curentul redresat în general depășește 0,5 A sau tensiunea redresată necesară depășește 1 000 V. În determinarea combinației celei mai potrivite de elemente $L-C$ în filtru, joacă un rol costul relativ al inductanțelor și condensatoarelor. Pentru puteri redresate care depășesc valorile indicate mai sus se preferă de obicei un redresor polifazat, care cu un filtru relativ simplu poate da o ondulație acceptabilă.

Filtrul cel mai des utilizat la redresoarele de putere mică este filtrul cu intrare pe condensator, arătat în fig. 168. El este utilizat aproape universal în radioreceptoare. În receptoarele care folosesc un difuzor electrodinamic cu excitație, bobinajul de excitație al difuzorului joacă în același timp și rolul de inductanță în filtru. Prezența inductanței în circuitul din fig. 168 nu contribuie prea mult la scăderea valorilor eficace și de vîrf ale curentului prin tubul redresor pentru un anumit curent mediu dat. Acest tip de filtru nu trebuie utilizat în combinație cu gazotroane, afară numai dacă impedanța transformatorului sau a circuitului de alimentare este suficient de mare pentru a reduce mărimea curenților de vîrf în limite permise. Rolul inductanței din fig. 168 este numai de a reduce tensiunea de ondulație la bornele sarcinii. Totuși din cauza filtrajului suplimentar pe care-l oferă inductanța, primul condensator din filtru poate avea o valoare mult mai mică, care la rîndul ei face ca valorile eficace și de vîrf ale curentului prin tubul redresor să fie mult mai mici decît în cazul cînd n-ar fi existat inductanța.

Pentru motivele care s-au văzut la circuitele redresoare $R-C$ reglajul de tensiune al filtrului cu intrare pe condensator este prost și creșterea ondulației cu curentul de sarcină poate fi exagerată. Filtrul cu intrare pe inductanță indicat în fig. 161 este mai bun din ambele puncte de vedere. Mai mult decît atît, pentru același grad de filtraj legarea în serie a tubului redresor cu inductanța, face ca atît valoarea eficace, cît și valoarea de vîrf a curentului prin tub și prin transformator să fie mai mică în raport cu curentul continuu din sarcină, decît în cazul circuitului cu intrare pe condensator.

Un dezavantaj al filtrului cu intrare pe inductanță este că tensiunea care se obține în mod normal este doar aproximativ 65% din tensiunea care se obține în mod normal în cazul filtrului cu intrare pe condensator, pentru aceeași tensiune de alimentare alternativă, aplicată redresorului.

58. *Filtru cu intrare pe inductanță.* Analizarea circuitului redresor dublă-alternanță cu filtrul cu intrare pe inductanță se poate face prin metoda arătată la circuitul redresor mono-alternanță cu sarcina $R-L$, însă acest procedeu este relativ dificil. Deoarece în majoritatea cazurilor obișnuite de funcționare, curentul prin inductanță nu se anulează

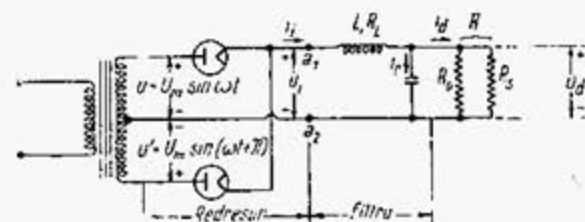


Fig. 161. — Circuit redresor dublă-alternanță cu filtru $L-C$, intrare pe inductanță.

niciodată, nici curentul prin inductanță și nici tensiunea la bornele condensatorului de la începutul fiecărei perioade nu este o condiție inițială cunoscută. Din acest motiv, determinarea formelor de undă ale curentului și tensiunii care rezultă ca o serie de fenomene tranzitorii repetate este foarte dificilă. Totuși faptul că curentul din inductanță nu se anulează niciodată, adică faptul că momentul cînd un element redresor încetează de a conduce, coincide cu momentul cînd celălalt element redresor începe să conducă, oferă o posibilitate de analiză relativ simplă a condițiilor de funcționare.

α) *Regim de funcționare cu curent neîntrerupt.* În cazul conducerii continue a curentului prin inductanță, forma de undă a tensiunii la intrarea filtrului (adică tensiunea la borne a_1, a_2 ale filtrului din fig. 161) este independentă de formele de undă în alte puncte ale filtrului, cum și de constantele filtrului și ale sarcinii.

De exemplu, dacă se utilizează gazotroane, potențialul bornei filtrului care se leagă la catodii tuburilor (borna a_1) este totdeauna cu aproximativ 10 V sub potențialul anodului care conduce. Tensiunea dintre anodul fiecărui tub și borna

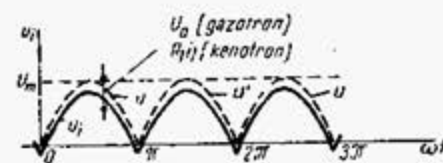


Fig. 162. — Forma de undă a tensiunii redresate care se aplică la intrarea filtrului din fig. 161, la bornele $a_1 - a_2$.

a_2 este dată de tensiunea transformatorului; tuburile, din cauza proprietăților lor de a conduce într-un singur sens, lucrează ca două întrerupătoare care comută tensiunea aplicată, astfel încît la bornele $a_1 - a_2$ ale filtrului apare o formă de undă redresată ca în fig. 162. Această formă de undă a tensiunii se produce numai atunci cînd fiecare tub conduce jumătate de perioadă completă, adică atunci cînd curentul prin inductanță este neîntrerupt. Forma de undă indicată în figură diferă de o tensiune

sinusoidală redresată numai prin aceea că ordonatele sale în orice punct sînt mai mici, ca valoarea U_0 corespunzătoare căderii de tensiune pe tub în stare de conducție.

β) *Metoda de calcul a circuitului redresor.* Pentru o formă de undă ca aceea arătată în fig. 162 curentul și tensiunea din fiecare ramură a filtrului și în sarcină se pot calcula ușor dacă elementele circuitului se presupun liniare. Calculul comportă trei etape:

1) tensiunea redresată se dezvoltă în serie Fourier;

2) fiecare componentă de tensiune din această serie se consideră aplicată la bornele de intrare $a_1 - a_2$ ale filtrului și se calculează curentul și tensiunea produse de fiecare componentă în sarcină;

3) componentele de curent și de tensiune obținute în fiecare ramură a circuitului se adună algebric, ținând seama de frecvență și faza lor și se obține curentul total din ramura respectivă.

Dacă se neglijează căderea de tensiune pe tub și dacă se presupune o tensiune sinusoidală de alimentare cu valoare eficace U , atunci forma de undă a tensiunii la intrarea filtrului u_i este o sinusoidă redresată, cu valoare maximă $\sqrt{2}U$. Seria Fourier pentru această formă de undă este:

$$u_i = \sqrt{2}U \left[\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right] \quad (58.1)$$

care cuprinde o componentă continuă și o serie de armonice pare.

În fig. 161 rezistența de sarcină este în paralel cu o rezistență suplimentară al cărei efect se va vedea mai jos. Pentru simplificarea relațiilor se notează cu R rezistența echivalentă a acestor două rezistențe în paralel. Această valoare coincide cu sarcina reală a redresorului R_s , numai dacă rezistența suplimentară se înalătură. Rezistența inductanței se notează cu R_L , iar inductanța condensatorului și impedanța de scurtcircuit a transformatorului se neglijează.

Curentul mediu redresat pentru starea de conducție continuă este:

$$I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R + R_L} \quad (58.2)$$

Tensiunea medie redresată este:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{R}{R + R_L} U \quad (58.3)$$

Dacă factorul de calitate Q al inductanței este mare, astfel încît $2\omega L$ să fie mare în raport cu R_L , cum se întâmplă de obicei, valoarea eficace a componentei de curent de armonica a doua din curentul de intrare i_2 este:

$$I_{i2} = \frac{4}{3\pi} \frac{U}{Z_i} \quad (58.4)$$

în care Z_i este mărimea complexă a impedanței:

$$Z_i = j2\omega L + \frac{1}{\frac{1}{R} + j2\omega C} \quad (58.5)$$

care este impedanța la bornele de intrare a filtrului.

Armonica a doua de tensiune și curent. Valoarea eficace a componentei de tensiune de armonica a doua la bornele rezistenței de sarcină este atunci:

$$U_2 = \frac{4}{3\pi} \frac{U}{Z_i} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (2\omega C)^2}} \quad (58.6)$$

În majoritatea aplicațiilor, este de dorit ca impedanța văzută de la bornele sarcinii spre filtru să fie mică pentru toate frecvențele curentilor care compun curentul de sarcină. Această condiție este necesară cu scopul ca componentele alternative ale curentului de sarcină care ar apărea din cauza variațiilor sarcinii, însăși să nu producă componente alternative corespunzătoare în tensiunea de la borne. Curentul de sarcină poate să conțină adesea componente alternative de frecvență foarte mici ca de exemplu 30 Hz. Pentru a satisface aceste cerințe de impedanță internă, reactanța condensatorului din filtru, la frecvența cea mai mică a componentelor alternative ale curentului de sarcină, trebuie făcută mică. În consecință, la frecvența mai mare a componentei de undulație de armonica a doua, reactanța condensatorului este de obicei neglijabilă față de rezistența de sarcină. Condensatorul din filtru prezintă o cale de scurtcircuit pentru toate componentele alternative de curent care în felul acesta sînt eliminate din rezistența de sarcină. În afară de aceasta reactanța condensatorului este aproape totdeauna neglijabilă în comparație cu reactanța inductanței la frecvența undulației. De fapt elementele filtrului sînt astfel alese încît această condiție să existe, pentru ca tensiunea de undulație să apară la bornele inductanței și nu la bornele sarcinii sau ale condensatorului. Pentru aceste motive, sînt juste următoarele relații:

$$2\omega L \gg \frac{1}{2\omega C} \ll R \quad (58.7)$$

și relațiile (58.4) și (58.6) se pot simplifica:

$$I_{i2} \approx \frac{4}{3\pi} \frac{U}{2\omega L} \quad (58.8)$$

și:

$$U_2 = \frac{I_{i2}}{2\omega C} = \frac{4}{3\pi} \frac{U}{4\omega^2 LC} \quad (58.9)$$

Armonica a patra de tensiune și curent. Pentru armonica a patra, aproximația de mai sus este cu atât mai mult variabilă:

$$4\omega L \gg \frac{1}{4\omega C} \ll R, \quad (58.10)$$

deci valoarea eficace a armonicii a patra a curentului la intrarea filtrului este:

$$I_{i4} \approx \frac{4}{15\pi} \frac{U}{4\omega L} \approx 0,1 I_{i2} \quad (58.11)$$

iar tensiunea armonicii a patra la bornele rezistenței de sarcină este:

$$U_4 \approx \frac{4}{15\pi} \frac{U}{16\omega^2 LC} \quad (58.12)$$

Factorul de undulație. Din relațiile (58.9) și (58.12) se obține raportul tensiunii de armonica a patra către tensiunea de armonica a doua la bornele rezistenței de sarcină:

$$\frac{U_4}{U_2} \approx \frac{1}{20} = 5\% \quad (58.13)$$

deci se vede că undulația se compune în mare parte numai din armonica a doua, iar factorul de undulație se poate lua aproximativ egal cu raportul $\frac{U_2}{U_d}$. Din relațiile (58.3) și (58.9) se obține:

$$\gamma = \frac{1}{6\sqrt{2}\omega^2 LC} \frac{R + R_L}{R} \quad (58.14)$$

care pentru o sursă de 50 Hz și pentru cazul când R este mare față de R_L se reduce la

$$\gamma \approx \frac{1,2 \cdot 10^{-6}}{LC} \quad (58.15)$$

Dacă γ se exprimă în decibeli, adică numărul de decibeli cu care tensiunea de undulație se află sub nivelul tensiunii medii, atunci din (58.15) se obține:

$$\gamma_{db} \approx 20 \lg \left(\frac{LC}{1,2 \cdot 10^{-6}} \right) \quad (58.16)$$

în care L este în henry și C în farazi, sau:

$$\gamma_{db} \approx 20 \lg (LC) - 1,58, \quad (58.17)$$

în care L este în henry și C în microfarazi.

O expresie puțin diferită de (58.14) sau (58.15) pentru factorul de undulație.

se obține dacă în locul condițiilor (58.7) se pune numai $\frac{1}{2\omega C} \ll R$, fără condiția

$2\omega L \gg \frac{1}{2\omega C}$, adică dacă se presupune o inductanță relativ mică. În acest caz:

$$\gamma \approx \frac{0,47}{4\omega^2 LC - 1} \quad (58.18)$$

În fig. 163, s-a reprezentat în coordonate logaritmice variația lui γ cu $\omega^2 LC$. Expresia (58.18) arată că factorul de undulație poate să crească la valori foarte mari, dacă dintr-o eroare de proiectare, valorile $L-C$ s-au ales astfel că celula de filtraj se apropie de rezonanță pe frecvența armonicii a doua (2ω).

La rezonanță ($2\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$) numitorul expresiei (58.18) se anulează ($4\omega^2 LC = 1$) și γ tinde (teoretic) spre infinit.

Curent de sarcină critic. În obținerea relațiilor (58.1) (58.18) s-a presupus curentul prin inductanță neîntrerupt. Această presupunere nu se realizează însă la orice valoare a sarcinii. Dacă curenții armonici de un ordin mai mare decât 2 se neglijează, curentul la intrarea filtrului se poate scrie sub forma:

$$i_t = I_d + \sqrt{2} I_{i2} \cos 2\omega t. \quad (58.19)$$

Forma de undă pentru cazul când curentul mediu I_d ar fi exact egal cu amplitudinea armonicii a doua $\sqrt{2} I_{i2}$ se vede în fig. 164.

Curba din această figură este o oscilogramă luată în cazul circuitului din fig. 161. Ea arată că în adevăr predomină armonica a doua, o constatare care este în concordanță cu relația (58.11).

Regim de funcționare în curent întrerupt. Deoarece inductanța este străbătută de un curent alternativ suprapus peste un curent continuu, curentul total prin inductanță reprezentat de relația (58.19) tinde să se inverseze la un moment oarecare al perioadei dacă curentul de sarcină se reduce astfel încât I_d tinde să devină mai mic decât $\sqrt{2} I_{i2}$. Totuși, tuburile redresoare nu conduc decât într-un singur sens, deci dacă I_d tinde să devină mai mic decât $\sqrt{2} I_{i2}$ conducția

trebuie să înceteze în acest moment al perioadei. Atunci are loc în circuit un fenomen tranzitoriu care se repetă la fiecare semi-perioadă. Analiza folosită în obținerea relațiilor (58.1) — (58.18) nu mai este aplicabilă, deoarece tensiunea la intrarea filtrului nu are forma de undă indicată în fig. 162. O dată întrerupt, curentul prin inductanță rămâne nul până când valoarea instantanee a tensiunii transformatorului aplicată tubului și circuitului depășește valoarea instantanee a tensiunii condensatorului.

Deoarece curentul de sarcină este în întregime furnizat de condensator în perioada de timp când curentul prin inductanță este nul, momentul din semi-perioada la care conducția reapare depinde de:

- tensiunea condensatorului la sfârșitul conducției;
- mărimea condensatorului;
- mărimea curentului;
- tensiunea și frecvența curentului.

Calculul tensiunii medii și a tensiunii de conducție la bornele sarcinii, când conducția nu este continuă, comportă o analiză mult mai complicată decât aceea arătată mai sus. Dacă durata corespunzătoare condiției de anulare a curentului crește din cauza creșterii rezistenței de sarcină, crește de asemenea tensiunea continuă la bornele sarcinii.

Tensiunea medie redresată. După cum s-a arătat la circuitul redresor cu sarcină $R-C$, pentru cazul rezistenței de sarcină infinite, sau curent de sarcină nul, tensiunea în regim staționar la bornele condensatorului este egală cu $\sqrt{2} U$.

În baza acestui raționament se poate prevedea forma generală a curbei U_d trasată în funcție de I_d . Pentru $I_d = 0$ tensiunea la sarcină U_d este egală cu $\sqrt{2} U$. Pentru I_d egal sau mai mare decât $\sqrt{2} I_{i2}$ analiza dată mai sus este valabilă. Atunci relația (58.3) dă valoarea U_d corespunzătoare.

După cum indică această relație, dacă se neglijează căderea de tensiune pe tub și rezistența inductanței, tensiunea continuă la ieșire este constantă pentru orice valoare I_d mai mare decât $\sqrt{2} I_{i2}$.

Curba U_d în funcție de I_d are forma arătată în fig. 165 în care linia punctată corespunde curbei idealizate, iar linia plină curbei reale, care diferă de curba ideală din cauza căderii de tensiune pe tub și pe rezistența inductanței.

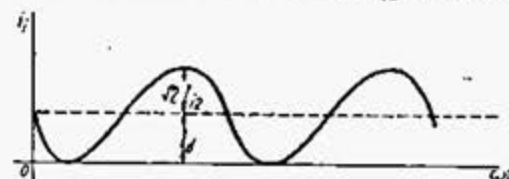


Fig. 164. — Forma de undă a curentului prin inductanța filtrului în cazul conducției neîntrerupte.

Rezistența de sarcină critică. Valoarea maximă aproximativă a rezistenței de sarcină pentru care tensiunea de la bornele sarcinii începe să crească repede, se găsește ușor, înlocuind pe I_d din (58.2) cu $\sqrt{2} I_{12}$ care este valoarea maximă a componentei de curent de armonica a 2-a, obținută din ecuația (58.8):

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R + R_L} = \frac{4\sqrt{2}}{3\pi} \frac{U}{2\omega L} \quad (58.20)$$

sau:

$$R + R_L = 3\omega L \quad (58.21)$$

Dacă frecvența sursei de alimentare este 50 Hz, ecuația (58.21) dă:

$$R + R_L = 942L \quad (58.22)$$

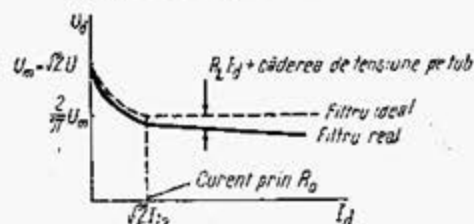


Fig. 165. — Caracteristica externă a unui redresor dublă-alternanță cu filtru $L-C$, intrare pe inductanță.

Din cauza nesiguranței cuprinse în ipotezele folosite la un calcul de acest fel, în practică se obișnuiește să se ia o valoare critică pentru R , adică pentru valoarea maximă pînă la care reglajul de tensiune este mic, sau valoarea de la care începe să se producă creșterea rapidă a tensiunii. În baza relației (58.22) se ia în mod așezător:

$$R = 900L \quad (58.23)$$

De obicei se montează în paralel cu rezistența de sarcină o rezistență suplimentară R_0 , avînd valoarea dată de (58.23), care menține un curent de sarcină minim necesar, pentru ca conducția prin inductanță să fie continuă. În felul acesta se evită creșterea tensiunii redresate la sarcinile mici, ceea ce ar putea provoca străpungerea dielectricului condensatorului din celula de filtraj, dacă s-ar întrerupe accidental legătura cu sarcina. Această rezistență este indicată în fig. 161 și curentul pe care ea îl absoarbe se arată în fig. 165.

Influența căderilor de tensiune pe tub și filtru. Într-un circuit real căderea de tensiune pe tub poate să nu fie totdeauna neglijabilă. Dacă se întrebuințează în redresor gazotroane, căderea de tensiune pe tub se poate presupune de obicei constantă. Atunci valorile medii și instantanee ale tensiunii aplicate la intrarea filtrului se pot corecta, scăzînd o valoare constantă U_0 care reprezintă căderea de tensiune pe tub și care de obicei este cuprinsă între 10–20 V. Dacă se întrebuințează un tub cu vid (kenotron), efectul său se poate lua în considerare dacă se reprezintă tubul printr-o rezistență constantă R_i în serie cu un element redresor ideal, așa cum s-a arătat la § 18 și fig. 115.

O aproximație ceva mai bună a caracteristicilor reale ale tubului se poate obține dacă tubul se reprezintă printr-o rezistență R_i în serie cu o pilă cu forța electromotoare U_0 în serie cu un element redresor ideal.

Rezistența R_i corespunde inversului pantei medii a caracteristicii tensiune-curent a tubului pe intervalul de funcționare, iar U_0 este abscisa la originea acestei pante medii. De obicei corecțiile indicate de relațiile (58.24)–(58.27) sînt satisfăcătoare în practică, totuși cel mai bun îndreptar este experiența obținută cu circuite reale.

Dacă se folosesc gazotroane a căror cădere de tensiune se reprezintă printr-o valoare constantă U_0 , curentul și tensiunea medie se obțin din relațiile:

$$I_d = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U - U_0}{R + R_L} \quad (58.24)$$

și:

$$U = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U - U_0 \right) \frac{R}{R + R_L} \quad (58.25)$$

Valoarea eficace a componentei de curent de armonica a doua rămîne neschimbată și este dată cu aproximație de relația (58.8).

La fel valoarea eficace a tensiunii de undulație este dată de relația (58.9). Factorul de undulație se modifică foarte puțin și se obține cu aproximație din relația (58.14) atît timp cît U_0 nu este mare în comparație cu $\sqrt{2} U$. Dacă efectul lui U_0 este important, determinarea mai precisă a factorului de undulație se poate face cu ajutorul relațiilor (58.9) și (58.25). În mod analog, dacă se folosește un tub cu vid și căderea sa de tensiune din starea de conducție se reprezintă prin tensiunea la bornele unei rezistențe constante R_i și ale unei tensiuni constante U_0 , valoarea medie a curentului și a tensiunii se obține din relațiile:

$$I_d = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U - U_0}{R + R_L + R_i} \quad (58.26)$$

și:

$$U_d = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U - U_0 \right) \frac{R}{R + R_L + R_i} \quad (58.27)$$

Pentru aceste condiții, tensiunea de undulație nu este influențată apreciabil decât numai dacă $2\omega L$ nu este mare în raport cu R_i sau R_L , iar factorul de undulație γ este dat de:

$$\gamma = \frac{R + R_L + R_i}{\left(6\sqrt{2} + 3\pi \frac{U_0}{U} \right) \omega^2 LCR} \quad (58.28)$$

Deși în fig. 161 este reprezentat un filtru cu o singură secțiune, se utilizează uneori filtre cu două și trei secțiuni, fiecare secțiune fiind compusă dintr-o inductanță serie și un condensator în derivație. Din analiza de mai sus și în baza ipotezelor folosite în obținerea relațiilor (58.1)–(58.18), tensiunea de undulație pentru un filtru cu două secțiuni este:

$$U_2 \approx \frac{4}{3\pi} \frac{U}{(4\omega^2 L_1 C_1)(4\omega^2 L_2 C_2)} \quad (58.29)$$

în care L_1 și L_2 sunt inductanțele din prima și a doua secțiune și C_1 , C_2 capacitățile respective. Se observă că atenuarea tensiunii de undulație este proporțională cu produsul lui $(\omega^2)^n$, cu produsele LC pentru cele n secțiuni de filtru. Fiecare secțiune LC reduce tensiunea de undulație în raportul $1/4\omega^2 LC$.

7) *Nelinaritatea elementelor de filtraj ($L-C$)*. Calculul circuitelor redresoare cu filtru se face foarte rar cu o precizie mare, deoarece nu se cunosc cu certitudine valorile L și C , folosite în circuit. Chiar și condensatoarele de cea mai bună calitate sunt neliniare și capacitatea lor incrementală (valoarea care determină eficacitatea acțiunii lor de filtraj) depinde de vîrsta lor, de tensiunea medie aplicată, de temperatură și de alți factori. De asemenea valoarea care trebuie utilizată pentru L , care este o inductanță incrementală, variază cu curentul redresat, deoarece prezența componentei de curent continuu în bobinajul șocului de filtraj modifică permeabilitatea aparentă sau incrementală a miezului mai mult sau mai puțin, după valoarea curentului continuu. Deși se întrebuițează un întrefier în miezul magnetic al inductanței, parametrul L este adesea neliniar.

8) *Șoc de filtraj fluctuant*. Un tip de filtru deseori întrebuițat folosește un șoc de filtraj astfel construit încît inductanța lui incrementală¹⁾ scade mult cînd crește curentul continuu. Un astfel de șoc se cunoaște sub numele de «șoc fluctuant». Dacă filtrul este astfel calculat încît valorile L și C să dea un filtraj satisfăcător la plină sarcină, creșterea lui L care se produce atunci cînd I_d scade, reușește să mențină un filtraj bun. Creșterea lui L servește să micșoreze tensiunea de undulație și în același timp să micșoreze valoarea critică a curentului ($I_d = \sqrt{2} I_{(2)}$) față de cazul cînd s-ar folosi o valoare fixă pentru L . În modul acesta crește intervalul în care poate varia I_d fără ca să se producă prin aceasta creșterea lui U_d peste

valoarea $\frac{2\sqrt{2}U}{\pi}$. Se poate arăta că un șoc cu întrefier are o inductanță incrementală dată cu aproximație de expresia:

$$L = Dn^2 \operatorname{sech} \left(\frac{an I_d}{l} \right), \quad (58.30)$$

în care: L este inductanța incrementală în H;

n — numărul de spire;

D și a — constante depinzînd de caracteristicile tolelor magnetice;

l — lungimea circuitului magnetic;

I_d — curentul mediu (continuu) care produce magnetizarea.

Pe de altă parte, din (58.21) se obține o relație între rezistența de sarcină și inductanța minimă necesară, pentru a menține regimul de curent nelnterupt:

$$L \approx \frac{R}{3\omega} \quad (58.31)$$

Comparînd (58.30) și (58.31) se vede că un șoc fluctuant realizează destul de bine condiția inductanței minime. Cînd I_d scade, L crește automat, astfel că condiția (58.31) rămîne respectată.

¹⁾ Inductanța la mici variații ale curentului sau fluxului.

În fig. 166 este reprezentată variația inductanței unui șoc fluctuant într-un caz concret (curba a), care se compară cu inductanța minimă necesară (curba b), cînd sarcina variază. În acest exemplu, rezistența suplimentară se alege 3 000 Ω , pentru ca curentul I_d să nu scadă sub valoarea 0,250 A corespunzătoare punctului de intersecție al curbelor, cînd șocul n-ar mai respecta condiția (58.31). Cînd se folosește un șoc fluctuant într-un filtru

care se compune din mai multe secțiuni $L-C$, proprietățile sale sînt de două ori folositoare, numai dacă se leagă direct la catodii tuburilor, adică dacă ocupă locul primei inductanțe din filtru. Această legătură este necesară pentru ca relația (58.21) se referă numai la I și inductanța incrementală a primei inductanțe; condiția pentru conducția continuă în prima inductanță nu este influențată prin adăugarea unor secțiuni de filtru suplimentare. Prima inductanță joacă un rol dublu deoarece ea servește să limiteze tensiunea de undulație și să determine valoarea minimă a lui I_d pentru un reglaj de tensiune bun. Cu valorile obișnuite care se dau lui C , inductanța din celelalte secțiuni ale filtrului au rolul numai de a micșora tensiunea de undulație, efectul pe care îl are creșterea inductanței incrementale din aceste secțiuni cu creșterea lui I_d este neglijabilă.

e) *Verificări experimentale*. După cele arătate mai sus, proprietatea circuitului care se determină cel mai ușor este tensiunea medie redresată. Ea se calculează de obicei cu o eroare mai mică de cîteva procente fără mare dificultate. Tensiunea de undulație însă nu se poate calcula cu o astfel de precizie, de aceea, cînd pentru o aplicație dată se impune o limită pentru tensiunea de undulație, se recomandă să se protejeze redresorul cu margine de siguranță sau să se construiască un prototip asupra căruia să se măsoare tensiunea de undulație. Datele arătate în exemplul de mai jos ilustrează în ce măsură rezultatele experimentale concordă cu cele de calcul pentru un circuit redresor cu filtru $L-C$ și intrare pe inductanță, ca cel din fig. 161.

Aplicație. Se consideră un șoc cu o rezistență de 3,3 Ω și o inductanță de aproximativ 1,58 H. Condensatorul are o capacitate de aproximativ 53 μF . Impedanța de scurtcircuit a transformatorului de alimentare se neglijează. Valorile elementelor din circuit sînt astfel alese încît să satisfacă condiția ca $2\omega L$ să fie mare față de $\frac{1}{2\omega C}$ și să dea valori pentru $I_{(2)}$ și U_2 care să poată fi ușor măsurate

fără a produce perturbații în funcționarea circuitului. Mărimile L și C din acest exemplu corespund unui filtru excepțional de bun. Valoarea efectivă a tensiunii U aplicată între fiecare anod al redresorului și priza mediană a transformatorului este 220 V la 50 Hz. Dacă tubul redresor este un gazotron cu o tensiune $U_0 = 10$ V, relația (58.27) dă:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 220 - 10 = 188 \text{ V.} \quad (58.32)$$

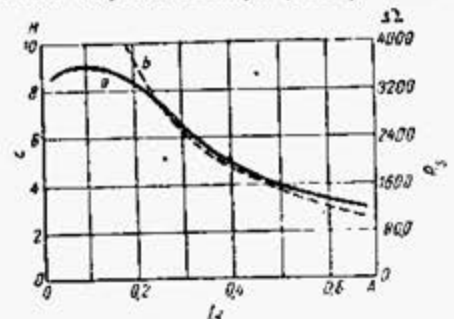


Fig. 166. — Caracteristici de funcționare în cazul unui șoc fluctuant: a — variația inductanței șocului fluctuant cu componenta continuă a curentului redresat; b — variația rezistenței de sarcină, cu curentul redresat, la tensiune constantă $U_d = 720$ V.

Se neglijează căderea de tensiune continuă în rezistența șocului. Din (58.8) se obține:

$$I_{i2} = \frac{4}{3\pi} \frac{220}{2 \cdot 311 \cdot 1,58} = 0,094 \text{ A.} \quad (58.33)$$

Iar din (58.9):

$$U_2 = \frac{I_{i2}}{2\omega C} = \frac{0,094}{2 \cdot 314 \cdot 53 \cdot 10^{-6}} = 2,82 \text{ V;} \quad (58.34)$$

de asemenea din (58.11):

$$I_{i1} = 0,1 I_{i2} = 0,1 \cdot 0,094 \approx 0,009 \text{ A.} \quad (58.35)$$

Din (58.33) și (58.35) se poate obține valoarea eficace a curentului prin condensator, care este rezultanta armonicilor a doua și a patra:

$$I_c = \sqrt{0,094^2 + 0,009^2} \approx 0,0945 \text{ A.} \quad (58.36)$$

Valoarea maximă a rezistenței de sarcină R pentru un reglaj de tensiune bun se obține cu aproximație din (58.23):

$$R = 900 \cdot 1,58 = 1422 \Omega. \quad (58.37)$$

Valoarea lui I_d , sub care tensiunea începe să crească repede este:

$$I_d = \frac{188}{1422} = 0,132 \text{ A.} \quad (58.38)$$

În fig. 167 s-a reprezentat caracteristica tensiune-curent pentru acest redresor obținut experimental; curba plină corespunzând unui gazotron lip 83 și curba punctată unui kenotron 5Z3.

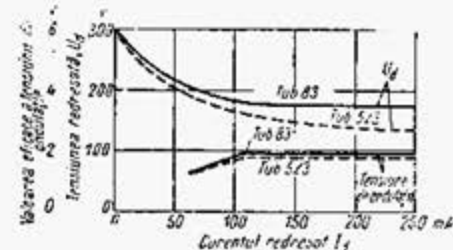


Fig. 167. - Curbele experimentale ale tensiunii medii redresate și ale tensiunii de ondulație în cazul unui filtru cu intrare pe inductanță.

cu o eroare de 5% sau mai mult, din cauza dificultății de a măsura aceste mărimi.

O potrivire la fel de satisfăcătoare între valorile calculate și cele măsurate se găsește pentru circuitul de mai sus și în cazul utilizării kenotronului 5Z3: pentru acest caz se folosesc relațiile (58.26) și (58.27) în care se introduc valori potrivite pentru R_i și U_0 .

59. Filtru cu intrare pe condensator. Analiza filtrului cu intrare pe condensator este ceva mai complicată decât a filtrului cu intrare pe inductanță. Pentru

cazurile întâlnite în practică se pot admite însă anumite ipoteze simplificatoare, cu ajutorul cărora se poate face calculul ceva mai ușor și cu rezultate acceptabile.

Forma de undă a tensiunii redresate la bornele primului condensator C_1 din fig. 168 într-o primă aproximație se aseamănă cu o formă de undă a tensiunii la bornele rezistenței de sarcină din fig. 137b. Valoarea maximă a lui u_i care reprezintă tensiunea la bornele acestui condensator este mai mică decât valoarea maximă a tensiunii de alimentare din cauza căderii de tensiune pe tubul redresor și a efectului de limitare a curentului produs de impedanța transformatorului. Din cauza inductanței din filtru, curentul din primul condensator, în timpul perioadei cînd tubul nu conduce, nu mai are aici o formă exponențială în funcție de timp; pentru majoritatea circuitelor întâlnite în practică acest curent are forma unui curent constant, peste care se suprapune o componentă de armonică a doua. Pentru acest motiv, momentele cînd conducția începe și se oprește în tuburile redresoare sînt altele decât cele arătate în fig. 132. Se observă în particular că comportarea filtrului cu intrare pe condensator nu se poate obține din forma de undă arătată în fig. 162 pentru tensiunea la bornele de intrare ale filtrului deoarece curentul i în circuitul din fig. 168 se anulează totdeauna în cuprinsul unei perioade. Deci există un interval de timp în care bornele de intrare ale filtrului nu apar legate efectiv la bornele transformatorului și în consecință tensiunea de la intrarea filtrului nu are forma de undă dată de (58.1) sau de fig. 162.

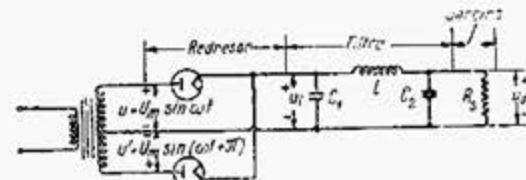


Fig. 168. - Redresor dublu alternanță cu filtru L-C intrare pe condensator.

Această formă de undă depinde de parametrii filtrului și de curentul de sarcină. Din aceste motive o tratare analitică a problemei este dificilă. Tensiunea medie redresată. Pentru a găsi valoarea medie a tensiunii redresate se recurge de obicei la metode experimentale. Pentru a putea determina performanța redresoarelor cu filtru avînd intrarea pe condensator, se furnizează de obicei, odată cu tubul redresor, caracteristici experimentale de felul celor arătate în fig. 169. Aceste caracteristici arată valoarea medie a tensiunii la intrarea filtrului în funcție de curentul mediu redresat, pentru diferite mărimi ale valorii eficace a tensiunii de alimentare U , pentru capacitatea de intrare C_1 și pentru impedanța sursei. Pentru a găsi tensiunea medie la bornele de ieșire este suficient să se scadă din tensiunea de mai sus valoarea medie a căderii de tensiune pe inductanță $R_L \cdot I_d$.

Datele nominale ale tubului și caracteristicile transformatorului permit de obicei curentului maxim admis pentru tub să poată încărcă primul condensator la o tensiune care diferă foarte puțin de valoarea maximă a tensiunii aplicate. În aceste condiții sau cînd mărimea Δu cu care tensiunea maximă a primului condensator rămîne mai jos decât amplitudinea tensiunii de alimentare este mică și poate fi apreciată cu suficientă precizie, se poate calcula tensiunea medie redresată și tensiunea de ondulație. În ipoteza cînd Δu este cunoscut, amplitudinea tensiunii pe primul condensator este:

$$u_{i \max} = \sqrt{2} U - \Delta u. \quad (59.1)$$

Dacă se presupune că redresorul încetează să conducă cînd tensiunea condensatorului atinge această valoare maximă, tensiunea minimă $u_{i \min}$ la bornele condensatorului diferă de $u_{i \max}$ cu căderea de tensiune produsă în timpul cînd tubul nu

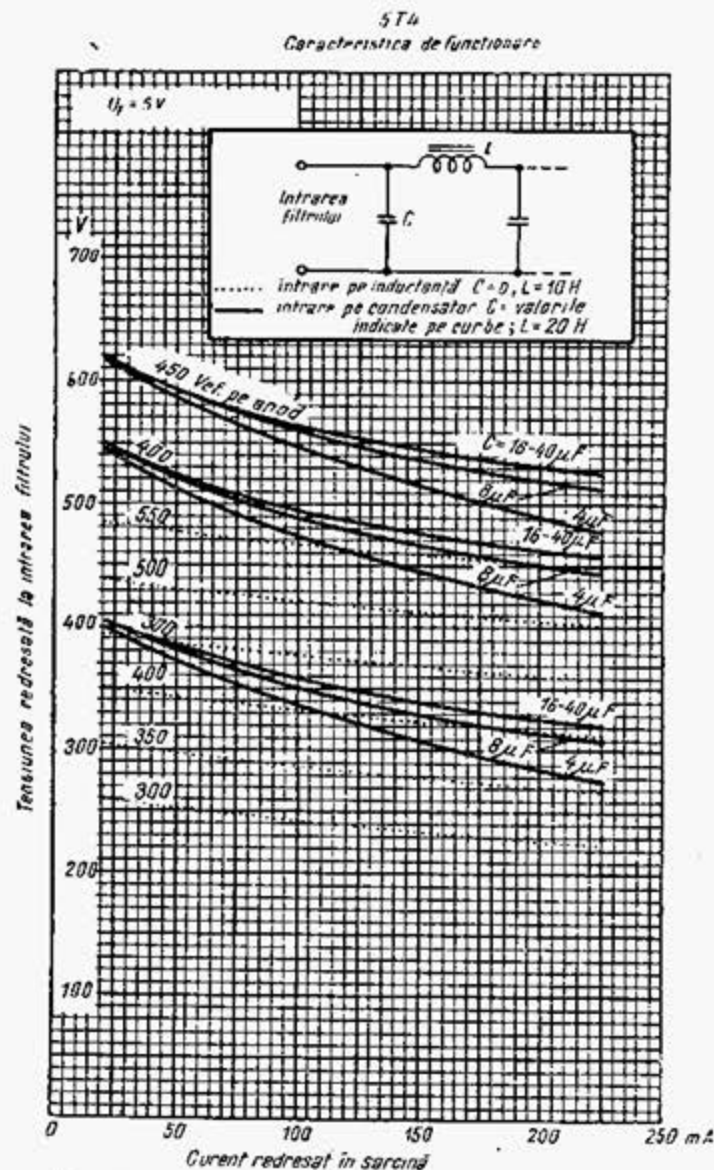


Fig. 169. — Caracteristici externe ale unui redresor dublă-alternanță cu filtru $L-C$ și tub tip 5T4.

conduce. Dacă curentul în inductanță se presupune constant (presupunere care înseamnă în fond că L este destul de mare ca să mențină undulația curentului mică) scăderea tensiunii primului condensator este:

$$u_{i \max} - u_{i \min} = \frac{I_d t_1}{C_1} \quad (59.2)$$

în care t_1 este intervalul de timp din fiecare semiperioadă cînd tubul nu conduce și C_1 este capacitatea primului condensator. Forma de undă aproximativă a lui u_i este arătată de linia plină din fig. 170. Dacă atît creșterea cîl și descreșterea lui u_i se presupune liniară, tensiunea medie la sarcină se poate scrie:

$$U_d = \frac{u_{i \max} + u_{i \min}}{2} = R_L I_d = U_{d1} = R_L I_d \quad (59.3)$$

care cu ajutorul relației (59.2) se poate pune sub formă:

$$U_d = u_{i \max} - I_d \left(\frac{t_1}{2C_1} + R_L \right) \quad (59.4)$$

în care R_L este rezistența șocului de filtraj.

Din cauza ipotezelor făcute, rezultatul obținut în (59.4) este suficient de exact numai cînd $u_{i \max}$ este aproape egal cu $\sqrt{2} U$ și cînd diferența $u_{i \max} - u_{i \min}$ este mică. Rezultatul depinde de asemenea de precizia cu care se cunoaște t_1 .

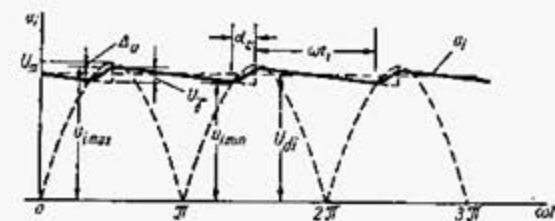


Fig. 170. — Formă de undă aproximativă a tensiunii u_i la intrarea unui filtru $L-C$, cu intrare pe condensator.

Pentru ca diferența $u_{i \max} - u_{i \min}$ să fie mică, perioada de conducție a tuburilor trebuie să fie mică și t_1 aproape egal cu $\frac{1}{2f}$, în care f este frecvența de alimentare. Forma de undă a tensiunii u_i se poate atunci aproxima prin curba punctată din fig. 170, în timpul perioadei de conducție, astfel încît

$$U_d \approx u_{i \max} - I_d \left(\frac{1}{4fC_1} + R_L \right) \quad (59.5)$$

Tensiunea de undulație $u_i - U_{d1}$ la primul condensator are într-o primă aproximație forma de undă triunghiulară arătată de liniile pline și punctate din fig. 170. Dezvoltarea în serie Fourier a acestei forme de undă conduce la:

$$u_i - U_{d1} = \frac{U_Y}{\pi} \left[-\sin 2\omega t + \frac{\sin 4\omega t}{2} - \frac{\sin 6\omega t}{3} + \dots \right] \quad (59.6)$$

în care:

$$U_T = u_{i \max} - u_{i \min} \approx \frac{I_d}{C_1} \frac{1}{2f} \quad (59.7)$$

Într-un mod analog cu cel utilizat la analiza filtrului cu intrarea pe inductanță se poate găsi valoarea eficace a curentului de armonică a doua care trece prin inductanța filtrului:

$$I_{I_2} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{U_T}{Z_I} \quad (59.8)$$

În care Z_I este dat de (58.5) dacă C se înlocuiește cu C_2 , adică capacitatea condensatorului în paralel cu rezistența de sarcină. Valoarea eficace a tensiunii de armonică a doua, la bornele rezistenței de sarcină este:

$$U_2 \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{U_T}{Z_I} \left| \left(\frac{1}{R} \right)^2 + (2\omega C_2)^2 \right|^{-1/2} \quad (59.9)$$

De obicei ipotezele:

$$2\omega L \gg \frac{1}{2\omega C_2} \ll R$$

sînt valabile în cazul filtrului cu intrarea pe condensator ca și în cazul condițiilor (58.7) scrise pentru filtrul cu intrarea pe inductanță. Cu aceasta (59.8) și (59.9) se simplifică:

$$I_{I_2} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{U_T}{2\omega L} \quad (59.10)$$

și:

$$U_2 \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{U_T}{\omega^2 L C_2} \quad (59.11)$$

Comparînd relația (58.3) cu (59.5) și relația (58.9) cu (59.11) se vede că performanța filtrului cu intrare pe inductanță este în anumite privințe superioară performanței filtrului cu intrarea pe condensator. Din (58.9) se vede că tensiunea de undulație la filtrul cu intrare pe inductanță este practic independentă de curentul de sarcină; pe cînd din (59.7) și (59.11) se vede că tensiunea de undulație la un filtru cu intrare pe condensator este într-o primă aproximație proporțională cu curentul de sarcină. Această situație se vede mai bine dacă relația (59.11) se scrie sub forma:

$$U_2 \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\omega^2 L C_2} \frac{I_d}{2f C_1} \quad (59.12)$$

De asemenea din (58.3) se vede că tensiunea medie redresată este aproape independentă de curentul de sarcină în cazul filtrului cu intrare pe inductanță, cu condiția ca căderea de tensiune pe tub, căderea de tensiune medie pe inductanță și căderea de tensiune provocată de impedanța sursei să fie mici în comparație cu tensiunea la bornele sarcinii. Din (59.5) se vede însă că la filtrul cu intrare pe condensator tensiunea medie redresată este influențată de curentul de sarcină,

cu atît mai mult cu cît termenul $I_d(t_1/2C_1)$ este mai mare. Aceste efecte sînt scoase în evidență de curbele experimentale din fig. 169. Deoarece capacitatea C_1 nu se poate mări dincolo de o anumită limită, fără a mări curentul de vîrf și curentul eficace permis în tubul redresor și pentru că în general se utilizează tuburi kenotroane cu o cădere de tensiune relativ mare, tensiunea medie redresată în cazul unui filtru cu intrare pe condensator scade de obicei mult cînd curentul de sarcină crește.

Determinarea grafică a undulației. Din cauza aproximațiilor făcute în calculul lui U_T rezultatele date de analiza de mai sus, pentru filtrul cu intrare pe condensator, sînt mai puțin precise decît cele date de analiza filtrului cu intrare pe inductanță. Eroarea provenind din ipoteza că t_1 este egal

cu $\frac{1}{2f}$ poate fi micșorată cînd căderea de tensiune pe tub este mică în comparație cu $\sqrt{2} U$, pentru că atunci $u_{i \max}$ este practic egal cu $\sqrt{2} U$ și t_1 se poate determina grafic cu suficientă precizie, așa cum se arată mai jos. În aceste condiții:

$$u_{i \max} - u_{i \min} = \sqrt{2} U - \sqrt{2} U \cos \alpha_c \quad (59.13)$$

în care α_c astfel cum se vede în fig. 170, este diferența dintre unghiul care corespunde momentului de începere a conducției și unghiul care corespunde momentului cînd tensiunea aplicată atinge maximumul său pozitiv următor. Atunci, deoarece conducția pe tub se presupune că încetează în momentul cînd tensiunea aplicată se află la maximum:

$$\alpha_c + 2\pi/t_1 = \pi \quad (59.14)$$

și α_c se poate considera unghiul de conducție. Pentru un curent prin inductanță constant, relația (59.13) se mai poate scrie sub forma:

$$\frac{I_d \cdot t_1}{C_1} = \sqrt{2} U [1 - \cos(\pi - 2\pi/t_1)] \quad (59.15)$$

sau sub forma:

$$\frac{I_d \cdot t_1}{\sqrt{2} U C_1} = 1 - \cos(\pi - 2\pi/t_1) \quad (59.16)$$

În care t_1 este necunoscută. Soluția grafică a ecuației (59.16) se obține ușor din curbele date în fig. 171. Pantele liniilor drepte corespund la diferitele valori ale termenului $\frac{I_d}{\sqrt{2} U C_1}$, iar curba din partea dreaptă a diagramei corespunde la $1 - \cos \alpha_c$, unghiul α_c fiind măsurat de la dreapta la stînga de-a lungul axei absciselor.

Timpul t_1 este abscisa punctului de intersecție al dreptei cu curba.

Intervalul arătat pe axa absciselor corespunde la un timp egal cu $\frac{1}{2f}$

sau π radiani.

Curbele din fig. 171 sînt trasate pentru o sursă a cărei frecvență este 50 Hz. Ele servesc pentru orice valoare a tensiunii aplicate, cum și pentru orice valoare a curentului I_d prin inductanță și capacitatea C_1 , pentru care termenul $\frac{I_d}{\sqrt{2} U C_1}$ este mai mic decît aproximativ 30, dacă I_d este exprimat în A, C_1 în F și U în V. Curbele pot fi utilizate și în cazul cînd tensiunea de alimentare

are o frecvență f_1 diferită de 50 Hz, cu condiția ca scara de pe axa lui t să se multiplice cu $\frac{50}{f_1}$, iar constantele care indică panta liniilor drepte să se multiplice cu $\frac{f_1}{50}$. Valoarea lui t_1 este distanța luată, pe orizontală de la originea la punctul de intersecție al curbei cu linia dreaptă a cărei pantă corespunde la valoarea particulară a termenului $\frac{I_d}{\sqrt{2} U C_1}$. Când diferența Δu dintre valoarea

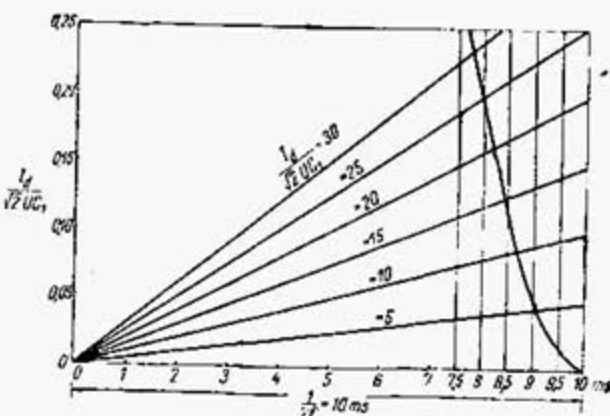


Fig. 171. — Construcție grafică pentru determinarea timpului t_1 în care tuburile redresoare nu conduc, la un redresor cu filtru $L-C$, intrare pe condensator.

maximă a tensiunii aplicate și valoarea maximă a tensiunii condensatorului nu este neglijabilă, dar nu este nici prea mare, de exemplu Δu este mai mic decât $0,05 \sqrt{2} U$ construcția din fig. 171 se mai poate întrebuința, dacă curba $1 - \cos x_c$ se deplasează printr-o translație în jos, egală cu $\frac{\Delta u}{\sqrt{2} U}$. Conducția în tuburile

redresoare poate continua și după ce tensiunea aplicată a atins valoarea sa maximă, deoarece inductanța transformatorului sau o mare cădere de tensiune pe tub întârzie creșterea tensiunii condensatorului. În aceste condiții, condensatorul nu furnizează întregul curent din inductanță, după ce tensiunea aplicată a atins valoarea sa maximă, așa cum se presupune în ecuația (59.16), iar construcția din fig. 171 dă în acest caz o valoare pentru t_1 prea mare și deci o valoare pentru u_{min} prea mică. Adesea este posibil să se aprecieze o corecție satisfăcătoare care să se aplice lui t_1 într-o astfel de situație. Când o precizie mare este indispensabilă, analiza dată mai sus nu este satisfăcătoare. În acest caz, trebuie folosite metode experimentale sau metode de analiză mai exacte.

f) Alegerea tuburilor redresoare și a circuitelor

60. Criterii pentru alegerea tuburilor și transformatoarelor. a) Tipul tuburilor redresoare. Căderea de tensiune mică a tuburilor cu vapori de mercur oferă un randament mai mare în funcționarea circuitului redresor decât tuburile cu vid

înaintat. Deoarece această tensiune este perfect constantă pe întregul interval de valori ale curenților, reglajul de tensiune al circuitului redresat este mai bun decât în cazul tuburilor cu vid. Pentru un tub de o dimensiune dată și de o putere de încălzire a filamentului dată, tubul cu vapori de mercur permite trecerea unui curent mai mare decât tubul cu vid. Tensiunea de vîrf a tuburilor redresoare cu vapori de mercur este limitată din cauza pericolului de apariție a descărcării cu luminiscență care se poate transforma într-o străpungere și apariției unui arc în timpul semi-perioadei cînd anodul este negativ. Tubul redresor cu vapori de mercur și catod incandescent (gazotronul) este mult mai expus la distrugerii datorite suprasarcinilor sau temperaturilor scăzute: de aceea trebuie luate măsurile potrivite pentru a asigura ca tensiunea anodică să nu se aplice înainte ca să fi atins catodul temperatura de funcționare.

Un alt dezavantaj al tuburilor redresoare cu vapori de mercur constă în faptul că curentul anodic nu apare dacă tensiunea aplicată nu depășește căderea de tensiune normală pe tub.

Variațiile bruște ale curentului redresat care rezultă la începutul și la sfîrșitul perioadei de conducție produc fenomene tranzitorii și perturbații de înaltă frecvență dăunătoare pentru eventuale circuite de comunicație învecinate. Din acest motiv trebuie luate măsuri potrivite pentru a evita ca aceste perturbații să influențeze alte aparate, să fie transmise rețelei de curent alternativ, sau să fie radiate.

Tuburile redresoare cu grilă de comandă (tiratruanele) se folosesc în mod eficace în redresoarele de putere și înaltă tensiune pentru transmisiatoare radio. Utilizarea comenzii pe grilă oferă o metodă simplă de reglaj a tensiunii redresate în timpul punerii în funcțiune cu scopul de a evita supratensiuni în condensatoarele din filtru.

Comanda pe grilă se poate folosi și pentru a oferi un mijloc rapid de reglaj automat a tensiunii redresate. Comanda pe grilă oferă de asemenea posibilitatea întreruperii curentului anodic într-un interval de timp mai mic decât o perioadă a frecvenței de alimentare, cînd apare un scurtcircuit sau o altă suprasarcină. Circuitul poate fi proiectat astfel, încît energia acumulată în filtru să fie restituită rețelei printr-o funcționare în invertor în loc să fie disipată în arc.

Posibilitatea apariției arcului invers (curgerea curentului în sens invers) la redresoarele cu arc de mercur este redusă prin utilizarea grilelor.

β) Construcția transformatorului. Construcția transformatorului depinde de tipul circuitului redresor și al tuburilor. Factorii care trebuie luați în considerare sînt: puterile aparente în primarul și secundarul transformatorului, tensiunea secundarului și izolamentul necesar între bobinaje.

γ) Randamentul. Randamentul funcționării depinde de randamentul transformatorului și al tubului redresor. Randamentul tubului este mai mare la tuburile cu arc de mercur decât la tuburile cu vid înaintat. Randamentul ansamblului transformatorului și tuburilor redresoare crește cu durata de conducție a curentului anodic, astfel încît pentru a obține un randament mare se recomandă să se proiecteze un filtru, astfel ca durata de conducție a curentului prin fiecare tub să fie maximă. În unele circuite redresoare curentul curge numai într-un singur sens în fiecare bobinaj al transformatorului.

Componenta de curent continuu care rezultă saturează miezul transformatorului, reducînd randamentul prin creșterea curentului de magnetizare și a pierderilor histerezis și introducînd armonice în tensiunea secundară.

61. Criterii pentru alegerea circuitelor. α) Alimentarea filamentului. În unele circuite redresoare, catodii diferitelor tuburi se află la același potențial și tuburile pot fi alimentate la filamente de la aceeași sursă; în alte circuite, este necesar să se întrebuințeze, fie surse de filamente separate fie tuburi cu catodi

cu încălzire indirectă care să posedă o izolație potrivită între catodul propriu-zis și filamentul de încălzire.

β) *Frecvența undulației și amplitudinea.* Mărimea și costul unui filtru capabil să reducă factorul de undulație la o valoare dată a sarcinii scade, fiind frecvența de undulație la intrarea filtrului este mai mică.

Factorul de undulație admis la bornele sarcinii depinde de tipul de utilizare pentru care este destinată sursa de alimentare. În circuitul microfonului unui transmițător radio, factorul de undulație trebuie să fie mai mic decât 0,003 %. În amplificatoare de frecvență audio, care nu sînt urmate de etaje de amplificare de înaltă frecvență și o amplificare mare, factorii de undulație admiși pot fi cuprinși între 0,005 % și 0,05 %, fără a produce un zgomot de fond supărător. În unele cazuri se pot accepta factori de undulație de 1 %. În cazul oscilografelor catodice, un factor de undulație de 1 % reprezintă limita superioară admisibilă. În electronica industrială, factorul de undulație variază după felul aplicației; în unele cazuri se poate admite un factor de undulație atât de mare, încît ne putem dispensa de filtrul de netezire.

În general, frecvența undulației crește și amplitudinea undulației scade cînd numărul fazelor tensiunii redresate crește.

γ) *Tensiunea inversă de vîrf.* Deoarece tensiunea redresată care se poate obține este limitată de tensiunea inversă de vîrf pe care tubul o poate suporta, mărimea acestei tensiuni inverse este un factor important, care trebuie avut în vedere atît la alegerea tuburilor redresoare, cît și la alegerea circuitului redresor.

δ) *Curentul de vîrf și curentul mediu pe tub.* Viața unui tub redresor depinde atît de curenții de vîrf, cît și de curenții medii. Din acest motiv, acești curenți influențează alegerea tuburilor și circuitelor redresoare.

ε) *Reglajul de tensiune.* Reglajul de tensiune al unei surse de putere depinde nu numai de tipul tubului redresor, dar și de tipul circuitului și de rezistența diferitelor elemente din circuit.

II. Redresoare monofazate cu tensiune reglabilă

a) Metode de reglaj

62. *Reglarea tensiunii la bornele redresorului sau ale sarcinii,* poate fi realizată prin:

- variația tensiunii pe partea de curent redresat;
- variația tensiunii pe partea de curent alternativ;
- variația parametrilor elementelor redresoare (la tuburile cu electrod de comandă).

α) *Reglarea tensiunii pe partea de curent redresat.* Reglarea tensiunii pe partea de curent redresat se face introducînd o rezistență variabilă (reostat) în serie cu curentul redresat (fig. 172) sau o rezistență variabilă (potențiometrul) în paralel la bornele redresorului (fig. 173).

Acest mod de reglaj implică un consum de energie în rezistența de reglaj și randamentul global al redresorului scade mult; de aceea el nu se folosește de obicei decît la redresoarele de mică putere. În mod excepțional se poate folosi și la redresoare de putere mare, dar pentru reglaj de scurtă durată.

β) *Reglarea tensiunii pe partea de curent alternativ.* Reglarea tensiunii pe partea de curent alternativ se poate realiza prin montarea unor reostate în serie cu primarul transformatorului de alimentare al redresorului sau a unor inductanțe variabile. Ambele metode nu sînt recomandabile din cauza consumului de putere

reală (primul caz) sau de putere reactivă (cazul al doilea). În afară de aceasta, rezistențele sau reactanțele serie măresc impedența internă a redresorului și reglajul de tensiune (variația tensiunii redresate cu sarcina) se înrăutățește.

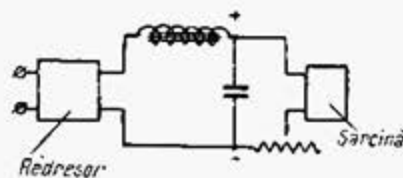


Fig. 172. — Reglarea tensiunii redresate prin reostat.

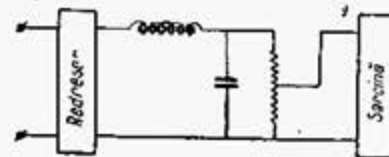


Fig. 173. — Reglarea tensiunii redresate prin potențiometrul.

Mult mai bun și rațional este reglajul cu autotransformator, fig. 174 sau 175. Autotransformatorul reglează tensiunea aplicată în primarul transformatorului de alimentare al redresorului. Peria de contact cu ploturile autotransformatorului este executată astfel ca să nu acopere două ploturi simultan și nici să întrerupă circuitul de alimentare. Pentru aceasta peria se face din două părți, una principală *a* și una secundară *b*, legate între ele printr-o rezistență relativ mică (fig. 174). Cînd aceste două perii calcă pe două ploturi vecine, spirele dintre aceste ploturi nu sînt puse direct în scurtcircuit, pentru că se intercalează rezistența *R*.

Metoda de reglaj cu autotransformator oferă posibilitatea reglajului tensiunii, fără consum de putere activă sau reactivă, adică fără înrăutățirea randamentului sau a factorului de putere; ea are însă inconvenientul că la puteri mari peria de contact nu dă rezultate satisfăcătoare.

Autotransformatorul cu ploturi permite reglarea tensiunii numai în salturi. Un reglaj mult mai fin se obține cu un autotransformator de tip special, denumit « variac » (fig. 175).

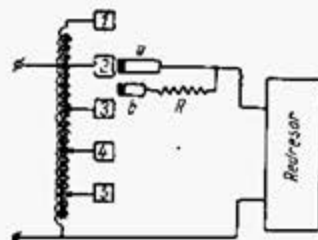


Fig. 174. — Reglarea tensiunii redresate prin autotransformator.

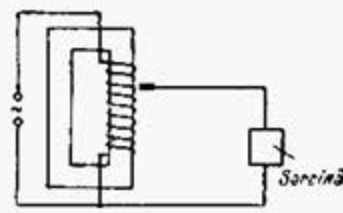


Fig. 175. — Schema de principiu a unui variac.

Variacul este în fond un autotransformator obișnuit, de multe ori cu miezul toroidal, la care pe stratul exterior al bobinajului s-a scris pe o porțiune izolamentului, astfel încît pe spirele goale să poată aluneca peria de contact. Peria se face din cărbune și atît de subțire încît să acopere cel mult două spire. Deoarece tensiunea scurtcircuitată de perie este mică (obișnuit pe o spirală revine 1 V), iar rezistența de contact cupru-cărbune este relativ mare, curentul de scurtcircuit este mic, iar încălzirea contactului neînsemnată. Tensiunea indusă pe spirală fiind mică, reglarea tensiunii obținută prin deplasarea periei se face în trepte foarte

mici, deci aproape continuu. Astfel de autotransformatoare se construiesc până la puteri de ordinul a câțiva kVA.

Un reglaj fin se mai poate obține și cu transformatorul tip *Noris* din fig. 176. Pe miezul transformatorului sunt înfășurate în sens contrar două bobine A și B. Mai există o bobină în scurtcircuit D, care poate să se deplaseze de-a lungul miezului. Dacă bobina D se găsește în poziția de sus, fluxul magnetic produs de bobina A este aproape în întregime compensat, iar în miez există numai fluxul produs de bobina B, care se închide, o parte prin miez, o parte prin aer. În acest caz tensiunea indusă în bobina A este aproape nulă, deci și tensiunea la bornele sarcinii. Dacă bobina D se deplasează peste bobina B, fenomenul se repetă în sens invers: nu există tensiune la bornele bobinei B și întreaga tensiune a rețelei se aplică bobinei A sau sarcinii. Deplasând bobina D între aceste două poziții extreme, se obține o variație progresivă (continuă) la bornele

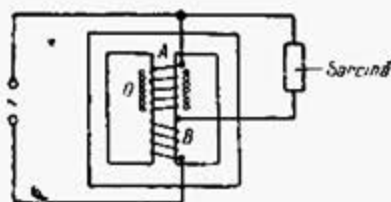


Fig. 176. — Schema de principiu a unui transformator tip *Noris*.

sarcinii. Reglatoarele de acest fel au o construcție simplă și pot fi construite pentru puteri destul de mari. Randamentul lor este 90—95 %, la $\cos \varphi = 0,8-0,92$.

γ) *Reglarea tensiunii prin tuburi cu electrod de comandă.* S-au văzut la § 25 și 42—47 metodele și circuitele de comandă a tiratronelor și ignitroanelor. Cu aceste circuite se pot realiza redresoare mono-alternanță și dublă-alternanță, cu tensiune redresată reglabilă. Prin variația momentului de aprindere a tubului, sau de început a conducției curentului anodic, se poate varia în mod progresiv și continuu valoarea medie a curentului redresat și deci a tensiunii redresate.

Avantajul principal al acestei metode este că reglarea tensiunii nu implică un consum de energie și nici pierse voluminoase auxiliare (reostat, potențiometre, autotransformatoare). De fapt, în circuitele de comandă se consumă o putere oarecare, dar aceasta este cu totul neglijabilă față de puterea redresată.

Această metodă prezintă însă și un dezavantaj, care poate fi important în unele aplicații. Tensiunea de ondulație a tensiunii redresate crește în raport cu tensiunea medie, cu cât întârzierea la aprindere a tubului este mai mare și forma pulsului de curent redresat se îndepărtează mai mult de forma unei jumătăți de sinusoidă.

În fig. 177, se dau trei exemple de redresoare monofazate cu tiratron, folosind metoda de comandă prin tensiune de grilă alternativă cu defazaj variabil față

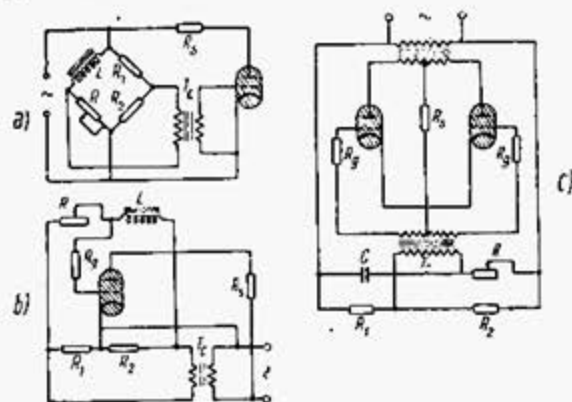


Fig. 177. — Circuite redresoare cu tiratron, comandate pe grilă prin reglaj de fază: a și b—scheme cu alimentarea punții de defazare direct de la rețea; c—schemă cu alimentarea punții printr-un transformator.

de tensiunea de alimentare a circuitului redresor. În fig. 177a, este reprezentat un redresor mono-alternanță cu punte de defazare R—L. În primarul transformatorului de comandă T_c se aplică o tensiune de amplitudine constantă și fază variabilă după valoarea rezistenței R; mărimea acestei tensiuni se modifică prin transformatorul la valoarea potrivită cu tipul de tub utilizat; legăturile la bornele secundarului trebuie astfel făcute încât tensiunea de grilă să fie defazată în urma tensiunii de alimentare a circuitului anodic. Curentul absorbit de transformatorul T_c' trebuie să fie mult mai mic decât curentii din punte. În fig. 177b, puntea de defazare este alimentată din secundarul transformatorului de comandă T_c ; limitarea curentului de grilă al tiratronului se face prin rezistența R_g .

În fig. 177c este reprezentat un redresor dublă alternanță. Pentru alimentarea grilelor cu tensiuni defazate la 180° , transformatorul de comandă se face cu priză mediană. Reactanța primarului acestui transformator trebuie să fie destul de mare pentru ca curentul absorbit să fie mult mai mic decât curentii din punte. Legăturile la bornele acestui transformator trebuie astfel făcute încât să se realizeze condiția de defazaj în urmă a tensiunii de grilă față de tensiunea de alimentare a fiecărui tub.

b) Teoria redresoarelor monofazate cu electrod de comandă

63. *Metode de analiză.* Analizarea funcționării unui circuit redresor folosind un tub cu electrod de comandă se face după aceleași principii ca cele folosite la redresoarele cu tuburi fără electrod de comandă. Ecuația diferențială a circuitului este aceeași, singura deosebire constând în condițiile inițiale. Momentul inițial este determinat de electrodul de aprindere, care prin tensiunea sa de comandă provoacă aprinderea tubului și apariția curentului anodic.

Calculul mărimilor electrice se face după regulile clasice ale analizei circuitelor electrice liniare în regim tranzitoriu. Elementul redresor se înlocuiește și aici printr-un element idealizat, cum s-a arătat la § 48; deci, deși circuitul este în fond neliniar, el se studiază în două situații complet distincte, în care datorită idealizării elementului redresor, se poate trata ca un circuit liniar: situația când elementul redresor este întrerupt ($R_i = \infty$) și situația când elementul redresor are o rezistență finită (R_i) constantă.

În ce privește punerea condițiilor inițiale, se reamintesc următoarele reguli fundamentale: într-un circuit cu inductanță, curentul nu poate varia brusc, iar viteza de variație a curentului prin inductanță depinde de tensiunea aplicată inductanței ($\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} u_L$); într-un circuit cu condensator, sarcina pe armături și tensiunea condensatorului nu poate varia brusc, iar viteza de variație a tensiunii depinde de curentul care traversează condensatorul ($\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i$).

În cele ce urmează, se vor examina pe scurt, cu titlu de exemplificare, numai câteva din circuitele redresoare monofazate cu tensiune reglabilă.

64. *Redresor monofazat, mono-alternanță, cu sarcină rezistivă (R_s).* În fig. 178d este reprezentat un circuit redresor mono-alternanță cu tiratron și sarcină rezistivă.

Curentul redresat ($i_d = i_a$). Dacă se neglijează căderea de tensiune pe tubul în starea de conducție, expresia valorii instantanee a curentului anodic sau a curentului redresat este:

$$i_a = \frac{U_m \sin \omega t}{R_s} \quad (\alpha < \omega t < \pi) \quad (64.1)$$

mici, deci aproape continuu. Astfel (de autotransformatoare se construiesc pînă la puteri de ordinul a cîțiva kVA.

Un reglaj fin se mai poate obține și cu transformatorul tip Noris din fig. 176. Pe miezul transformatorului sînt înfășurate în sens contrar două bobine A și B. Mai există o bobină în scurtcircuit D, care poate să se deplaseze de-a lungul miezului. Dacă bobina D se găsește în poziția de sus, fluxul magnetic produs de bobina A este aproape în întregime compensat, iar în miez există numai fluxul produs de bobina B, care se închide, o parte prin miez, o parte prin aer. În acest caz tensiunea indusă în bobina A este aproape nulă, deci și tensiunea la bornele sarcinii. Dacă bobina D se deplasează peste bobina B, fenomenul se repetă în sens invers: nu există tensiune la bornele bobinei B și întreaga tensiune a rețelei se aplică bobinei A sau sarcinii. Deplasînd bobina D între aceste două poziții extreme, se obține o variație progresivă (continuă) la bornele

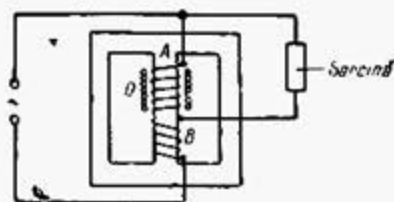


Fig. 176. — Schema de principiu a unui transformator tip Noris.

sarcinii. Reglatoarele de acest fel au o construcție simplă și pot fi construite pentru puteri destul de mari. Randamentul lor este 90–95 %, la $\cos \varphi = 0,8–0,92$.

γ) Reglarea tensiunii prin tuburi cu electrod de comandă. S-au văzut la § 25 și 42–47 metodele și circuitele de comandă a tiratronelor și ignitroanelor. Cu aceste circuite se pot realiza redresoare mono-alternanță și dublă-alternanță, cu tensiune redresată reglabilă. Prin variația momentului de aprindere a tubului, sau de început a conducerii curentului anodic, se poate varia în mod progresiv și continuu valoarea medie a curentului redresat și deci a tensiunii redresate.

Avantajul principal al acestei metode este că reglarea tensiunii nu implică un consum de energie și nici piese voluminoase auxiliare (reostat, potențiometre, autotransformatoare). De fapt, în circuitele de comandă se consumă o putere oarecare, dar aceasta este cu totul neglijabilă față de puterea redresată.

Această metodă prezintă însă și un dezavantaj, care poate fi important în unele aplicații. Tensiunea de ondulație a tensiunii redresate crește în raport cu tensiunea medie, cu cît întârzierea la aprindere a tubului este mai mare și forma pulsului de curent redresat se îndepărtează mai mult de forma unei jumătăți de sinusoidă.

În fig. 177, se dau trei exemple de redresoare monofazate cu tiratron, folosind metoda de comandă prin tensiune de grilă alternativă cu defazaj variabil față

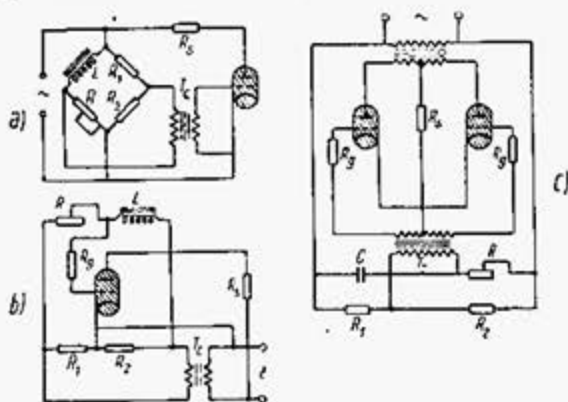


Fig. 177. — Circuite redresoare cu tiratron, comandate pe grilă prin reglaj de fază:

a și b — scheme cu alimentarea punții de defazare direct de la rețea; c — schemă cu alimentarea punții printr-un transformator.

de tensiunea de alimentare a circuitului redresor. În fig. 177a, este reprezentat un redresor mono-alternanță cu punte de defazare R–L. În primarul transformatorului de comandă T_c se aplică o tensiune de amplitudine constantă și fază variabilă după valoarea rezistenței R; mărimea acestei tensiuni se modifică prin transformator la valoarea potrivită cu tipul de tub utilizat; legăturile la bornele secundarului trebuie astfel făcute încît tensiunea de grilă să fie defazată în urma tensiunii de alimentare a circuitului anodic. Curentul absorbit de transformatorul T_c' trebuie să fie mult mai mic decît curentii din punte. În fig. 177b, puntea de defazare este alimentată din secundarul transformatorului de comandă T_c ; limitarea curentului de grilă al tiratronului se face prin rezistența R_g .

În fig. 177c este reprezentat un redresor dublă alternanță. Pentru alimentarea grilelor cu tensiuni defazate la 180° , transformatorul de comandă se face cu priză mediană. Reactanța primarului acestui transformator trebuie să fie destul de mare pentru ca curentul absorbit să fie mult mai mic decît curentii din punte. Legăturile la bornele acestui transformator trebuie astfel făcute încît să se realizeze condiția de defazaj în urmă a tensiunii de grilă față de tensiunea de alimentare a fiecărui tub.

b) Teoria redresoarelor monofazate cu electrod de comandă

63. Metode de analiză. Analizarea funcționării unui circuit redresor folosind un tub cu electrod de comandă se face după aceleași principii ca cele folosite la redresoarele cu tuburi fără electrod de comandă. Ecuația diferențială a circuitului este aceeași, singura deosebire constînd în condițiile inițiale. Momentul inițial este determinat de electrodul de aprindere, care prin tensiunea sa de comandă provoacă aprinderea tubului și apariția curentului anodic.

Calculul mărimilor electrice se face după regulile clasice ale analizei circuitelor electrice liniare în regim tranzitoriu. Elementul redresor se înlocuiește și aici printr-un element idealizat, cum s-a arătat la § 48; deci, deși circuitul este în fond neliniar, el se studiază în două situații complet distincte, în care datorită idealizării elementului redresor, se poate trata ca un circuit liniar: situația cînd elementul redresor este întrerupt ($R_i = \infty$) și situația cînd elementul redresor are o rezistență finită (R_i) constantă.

În ce privește punerea condițiilor inițiale, se reamintesc următoarele reguli fundamentale: într-un circuit cu inductanță, curentul nu poate varia brusc, iar viteza de variație a curentului prin inductanță depinde de tensiunea aplicată inductanței ($\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} u_L$); într-un circuit cu condensator, sarcina pe armături și tensiunea condensatorului nu poate varia brusc, iar viteza de variație a tensiunii depinde de curentul care traversează condensatorul ($\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i$).

În cele ce urmează, se vor examina pe scurt, cu titlu de exemplificare, numai cîteva din circuitele redresoare monofazate cu tensiune reglabilă.

64. Redresor monofazat, mono-alternanță, cu sarcină rezistivă (R_s). În fig. 178d este reprezentat un circuit redresor mono-alternanță cu tiratron și sarcină rezistivă.

Curentul redresat ($i_d = i_a$). Dacă se neglijează căderea de tensiune pe tubul în starea de conducție, expresia valorii instantanee a curentului anodic sau a curentului redresat este:

$$i_a = \frac{U_m \sin \omega t}{R_s} \quad (\alpha < \omega t < \pi). \quad (64.1)$$

Tubul se aprinde la unghiul α_a și se stinge la unghiul $\alpha_a \sim \pi$.

Valoarea medie a curentului redresat (I_d):

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\pi} \frac{U_m}{R_s} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi R_s} (1 - \cos \alpha_a), \quad (64.2)$$

sau:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi R_s} (1 - \cos \alpha_a), \quad (64.3)$$

Valoarea eficace a curentului redresat ($I_{de} = I_a$):

$$I_{de} = I_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\pi} \left(\frac{U_m}{R_s} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_m}{2R_s} \sqrt{\frac{\pi - \alpha_a + \sin \alpha_a \cos \alpha_a}{\pi}} \quad (64.4)$$

sau:

$$I_a = \frac{U}{\sqrt{2} R_s} \sqrt{\frac{\pi - \alpha_a + \sin \alpha_a \cos \alpha_a}{\pi}} \quad (64.5)$$

Tensiunea medie redresată (U_d):

Din (64.3) se obține:

$$U_d = R_s \cdot I_d = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi} (1 - \cos \alpha_a), \quad (64.6)$$

Curentul anodic de vîrf. Cînd $\alpha_a < \frac{\pi}{2}$,

din (64.1) rezultă, pentru $\omega t = \frac{\pi}{2}$:

$$I_p = \frac{U_m}{R_s} = \frac{\sqrt{2} U}{R_s} \quad (64.7)$$

Cînd $\alpha_a = \frac{\pi}{2}$, curentul de vîrf se produce la momentul inițial:

$$I_p = \frac{U_m \sin \alpha_a}{R_s} = \frac{\sqrt{2} U}{R_s} \sin \alpha_a. \quad (64.8)$$

În fig. 179 sînt reprezentate sub formă generalizată, variațiile principalelor mărimi electrice ale circuitului în funcție de unghiul de aprindere.

Se introduce o mărime de referință I_b , un curent de bază, care este valoarea eficace a curentului pe care l-ar debita transformatorul în rezistența R_s dacă n-ar fi intercalat tubul redresor:

$$I_b = \frac{U}{R_s}. \quad (64.9)$$

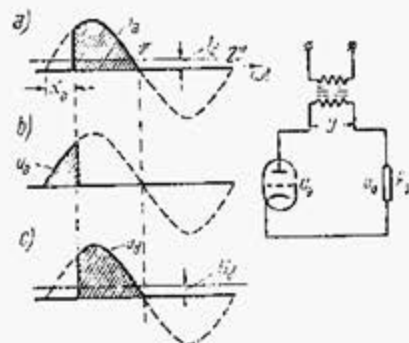


Fig. 178. - Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină rezistivă, comandat pe grilă:

a - forma de undă a curentului redresat; b - forma de undă a tensiunii pe elementul redresor; c - forma de undă a tensiunii redresate; d - schema de principiu.

Din diagrame se deduc următoarele concluzii:

- Valoarea medie a curentului și tensiunii redresate scade progresiv la zero cînd unghiul de aprindere α_a variază de la zero la π .

- Raportul dintre valoarea de vîrf sau valoarea eficace a curentului prin tub (sau prin transformator) și curentul mediu crește rapid cu α_a și fiind spre infinit cînd α_a tinde spre π . Reglajul nu trebuie împins pînă la valori α_a mari, pentru că la un curent I_d necesar, rezultă curenți I_p prea mari.

- Pentru $\alpha_a = 0$ se regăsesc valorile întâlnite la circuitul cu diodă, § 51.

Forme de undă. În fig. 178 a, se vede forma de undă a curentului redresat; este o porțiune din ce în ce mai mică dintr-o jumătate de sinusoidă cu cît α_a este mai mare.

În fig. 178b, se vede forma de undă a tensiunii pe tub (diferența de potențial anod-catod); în ipoteza neglijării căderii de tensiune pe tub, această tensiune este nulă cînd tubul conduce, iar cînd tubul nu conduce este egală cu tensiunea de alimentare U dată de transformator. Rezultă că tensiunea inversă de vîrf este:

$$U_p = U_m = \sqrt{2} U. \quad (64.10)$$

În fig. 178c, se arată forma de undă a tensiunii redresate care este identică cu aceea a curentului (la altă scară).

Se remarcă din aceste curbe un regim nesinusoidal, deformat, foarte pronunțat.

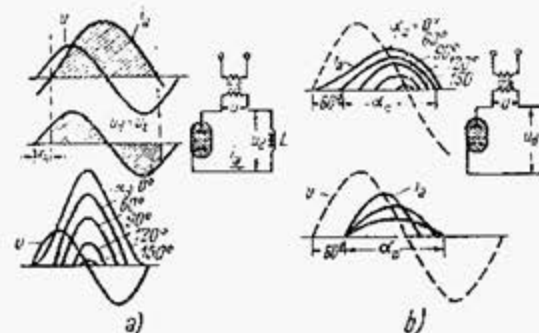


Fig. 180. - Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină inductivă, comandat pe grilă:

a - schema de principiu și formele de undă ale tensiunii și curentului redresat în cazul unei sarcini L ; b - schema de principiu și formele de undă ale curentului redresat în cazul unei sarcini $R-L$.

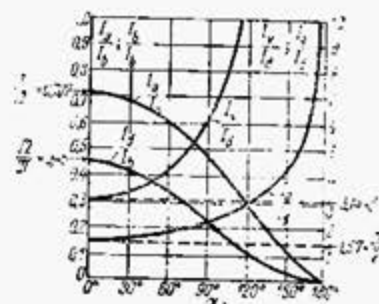


Fig. 179. - Variația curenților din circuitul din fig. 178 d, cu unghiul de comandă sau aprindere α_a .

65. Redresor monofazat, mono-alternanță, cu sarcină inductivă ($R_s = L$). În fig. 180 se consideră un circuit redresor mono-alternanță cu tiratron și sarcină inductivă R_s și L .

Curentul redresat ($i_d = i_a$). Ecuația diferențială a circuitului este:

$$L \frac{di_a}{dt} + R_s i_a = U_m \sin \omega t. \quad (65.1)$$

Ținînd seamă că la momentul inițial $\omega t_a = \alpha_a$, curentul este nul, soluția completă a ecuației (65.1) se găsește:

$$i_a = \frac{U_m}{R_s} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha_a - \varphi) e^{-\frac{R_s}{L}(\omega t - \alpha_a)} \right]. \quad (65.2)$$

în care: $U_m = \sqrt{2} U$ este amplitudinea tensiunii de alimentare;

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R_s} - \text{unghiul de fază al impedanței de sarcină } (x_a < \omega L < x_s);$$

$$\alpha_a - \text{unghiul de aprindere};$$

$$\alpha_s - \text{unghiul de stingere}.$$

Durata de conducție (α_c). Punctul $i_a = 0$ în (65.2) se găsește momentul de stingere al tubului α_s . Rezultă ecuația transcendentă:

$$\sin(\alpha_a + \alpha_c - \varphi) - \sin(\alpha_s - \varphi) \pm \frac{R_s}{\omega L} \alpha_c = 0 \quad (65.3)$$

din care se poate deduce unghiul de conducție $\alpha_c = \alpha_s - \alpha_a$, în funcție de α_a și de parametrii circuitului R_s și L .

Curentul mediu redresat (I_d). Din (65.1) se poate găsi direct curentul mediu:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} i_a d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} \left[\frac{U_m}{R_s} \sin \omega t - \frac{\omega L}{R_s} \frac{di_a}{d(\omega t)} \right] d(\omega t) =$$

$$= \frac{U_m}{2\pi R_s} (\cos \alpha_a - \cos \alpha_s). \quad (65.4)$$

sau:

$$I_d = \frac{U}{\sqrt{2} \pi R_s} (\cos \alpha_a - \cos \alpha_s). \quad (65.5)$$

Tensiunea medie redresată (U_d). Această tensiune apare la bornele rezistenței de sarcină R_s , dacă bobina L se consideră fără rezistență proprie.

Din (65.5) rezultă:

$$U_d = R_s I_d =$$

$$= \frac{U}{\sqrt{2} \pi} (\cos \alpha_a - \cos \alpha_s). \quad (65.6)$$

Fig. 181. — Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină inductivă, necomandat pe grilă:

a — schema de principiu și formele de undă ale tensiunilor și curentului în cazul unei sarcini R_s și L ;

b — schema de principiu și forma de undă a curentului și tensiunii redresate în cazul unei sarcini L .

Cazuri particulare. Dacă sarcina conține numai o inductanță sau dacă $\omega L \gg R_s$, ecuația (65.1) se poate scrie:

$$L \frac{di_a}{dt} = U_m \sin \omega t. \quad (65.7)$$

În acest caz, valoarea instantanee a curentului redresat este:

$$i_a = \frac{U_m}{\omega L} \int_{\alpha_a}^{\omega t} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \alpha_a - \cos \omega t). \quad (65.8)$$

Deoarece la $\omega t_s = \alpha_s$, curentul se anulează ($i_a = 0$), rezultă:

$$\cos \alpha_a = \cos \alpha_s.$$

Deci:

$$\alpha_s = 2\pi - \alpha_a = \alpha_a + \alpha_c,$$

sau:

$$\alpha_c = 2(\pi - \alpha_a). \quad (65.9)$$

Curentul mediu, după (65.8), rezultă:

$$I_d = \frac{U_m}{\omega L} \cos \alpha_a. \quad (65.10)$$

Diagrame generalizate. În fig. 182 sînt reprezentate sub formă generalizată, variațiile principalelor mărimi electrice ale circuitului în funcție de unghiul de aprindere α_a .

Se introduce un curent de referință I_b sau de bază:

$$I_b = \frac{U}{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{U}{Z}. \quad (65.11)$$

Curentul mediu raportat la curentul de referință rezultă din (65.5) și (65.11):

$$\frac{I_d}{I_b} = \frac{\sqrt{2} \cos \alpha_a - \cos \alpha_s}{2\pi \cos \varphi}. \quad (65.12)$$

În diagramă se mai reprezintă mărimile relative ale curentului anodic de vîrf (I_a/I_b) și ale curentului eficace (I_a/I_b). Expresia curentului I_a se poate obține din (65.2) aplicînd relațiile de definiție a valorii eficace:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_a}^{\alpha_s} i_a^2 d(\omega t)}. \quad (65.13)$$

Diagramele din fig. 182 corespund la două cazuri particulare extreme:

$$\frac{\omega L}{R_s} = \infty \text{ sau } R_s = 0 \text{ și } \frac{\omega L}{R_s} = 0 \text{ sau } L = 0.$$

Se pot trage următoarele concluzii:

— Valoarea medie a curentului și tensiunii redresate scad progresiv la zero cînd unghiul de aprindere α_a variază de la zero la π .

— Raportul dintre valoarea de vîrf sau valoarea eficace a curentului anodic și valoarea medie crește repede cu α_a și tinde spre infinit cînd α_a tinde spre π , dar pentru același unghi α_a , aceste rapoarte au o valoare mai mică decît în cazul cînd inductanța nu există.

— Pentru $\alpha_a = 0$ se regăsesc valorile întîlnite la circuitul cu diodă, § 55

Forme de undă. Ca titlu de comparație se arată în fig. 181 formele curbelor în cazul cînd $\alpha_a = 0$ sau tiratronul se comportă ca un gazotron.

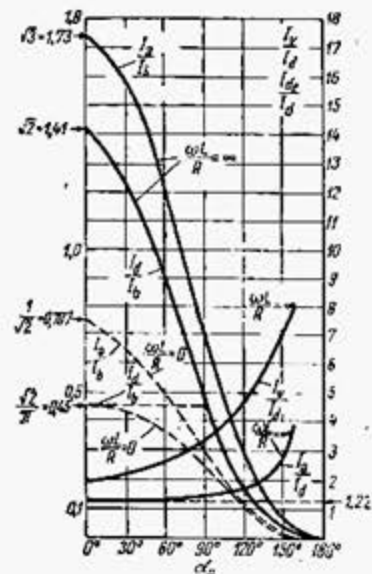


Fig. 182. — Variația curentilor în funcție de unghiul de comandă sau aprindere α_a pentru diferite valori ale raportului $\frac{\omega L}{R_s}$ la circuitul redresor din fig. 181.

Se remarcă în fig. 180a, că tensiunea la bornele inductanței se anulează în momentul când i_a trece prin maximum, iar când i_a se anulează ea scade brusc la zero. De asemenea, curentul i_a începe cu panta nulă la $\omega t = \alpha_a$ (pentru că $u_L = 0$) și se termină cu pantă negativă la $\omega t = \alpha_s$ (pentru că u_L este diferit de zero și negativ).

În fig. 180b, se vede că în cazul limită $\frac{\omega L}{R_s} \rightarrow \infty$ curentul nu se mai anulează niciodată, conducția este permanentă $\alpha_c = 2\pi$.

În fig. 181, se vede forma curentului anodic în cazul tiratronului. Spre deosebire de cazul când inductanța lipsea, curentul anodic începe totdeauna cu valoarea zero. Panta curentului la momentul inițial $\omega t = \alpha_a$ nu este nulă, pentru că în acest moment, potrivit cu ecuația (65.1):

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{U_m}{L_s} \sin \alpha_a. \quad (65.14)$$

Panta curentului la momentul final $\omega t = \alpha_s$ este, în mod analog:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{U_m}{L_s} \sin \alpha_s. \quad (65.15)$$

Din aceste curbe se remarcă și aici un regim nesinusoidal deformant pronunțat, dar mai atenuat decât în cazul când lipsea inductanța.

66. Redresor monofazat mono-alternanță cu sarcină rezistivă (R_s) și f.e.m. (E). În fig. 183d este reprezentat un circuit redresor mono-alternanță cu tiratron, cu sarcină rezistivă R_s și f.e.m. (E).

Curentul redresat ($i_d = i_a$). Dacă se consideră înglobată în f.e.m. E căderea de tensiune din starea de conducție a tubului, care acționează în circuit în același sens cu E , curentul anodic este:

$$i_a = \frac{U_m \sin \omega t - E}{R_s}. \quad (66.1)$$

Unghiul de aprindere (α_a) de stingere (α_s) și de conducție (α_c).

Expresia (66.1) este valabilă pentru $\alpha_a < \omega t < \alpha_s$.

Se observă că unghiul de comandă sau de aprindere α_a nu poate fi mai mic decât o valoare minimă:

$$\alpha_{a0} = \arcsin \frac{E}{U_m}. \quad (66.2)$$

De asemenea se observă că tubul se stinge la:

$$\alpha_s = \pi - \alpha_{a0}. \quad (66.3)$$

Rezultă un unghi de conducție:

$$\alpha_c = \alpha_s - \alpha_{a0} = \pi - 2\alpha_{a0} = \pi - 2 \arcsin \beta, \quad (66.4)$$

în care:

$$\beta = \frac{E}{U_m}.$$

Unghiul de conducție tinde spre zero când β tinde spre 1 sau f.e.m. tinde spre valoarea amplitudinii tensiunii de alimentare.

Valoarea medie a curentului redresat (I_d).

Din (66.1) se poate scrie:

$$i_a = I_{am} (\sin \omega t - \beta), \quad (66.5)$$

în care:

$$I_{am} = \frac{U_m}{R_s};$$

$$\beta = \frac{E}{U_m}.$$

Cu (66.5), valoarea medie este:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha_{a0}}^{\pi - \alpha_{a0}} i_a d(\omega t) = \frac{I_{am}}{2\pi} [1 - \beta^2 (1 + \cos \theta) - \beta (2 \arccos \beta + \sin \theta - \theta)], \quad (66.6)$$

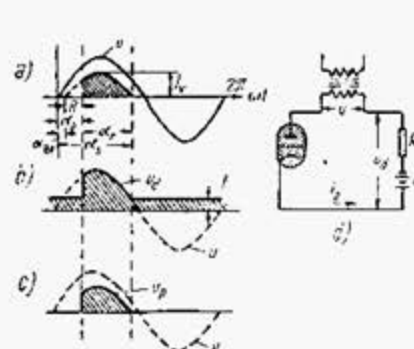


Fig. 183. — Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină rezistivă și forță contraelectromotoare, comandat pe grilă: a — forma de undă a curentului redresat; b — forma de undă a tensiunii redresate; c — forma de undă a tensiunii la bornele rezistenței; d — schema de principiu.

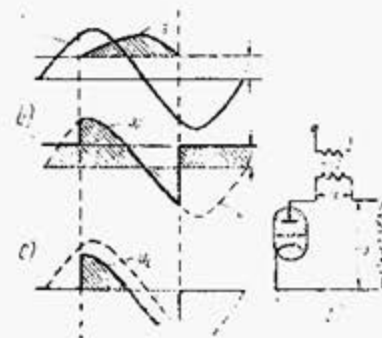


Fig. 181. — Circuit redresor mono-alternanță cu sarcină inductivă și forță contraelectromotoare, comandat pe grilă: a — forma de undă a curentului redresat; b — forma de undă a tensiunii redresate; c — forma de undă a tensiunii la bornele inductanței; d — schema de principiu.

Tensiunea medie redresată. Conform notației din fig. 183d:

$$U_d = E + R_s I_d. \quad (66.7)$$

Cu relația (66.6) se poate scrie:

$$U_d = E + \frac{U_m}{2\pi} [1 - \beta^2 (1 + \cos \theta) - \beta (2 \arccos \beta + \sin \theta - \theta)]. \quad (66.8)$$

Forme de undă. În fig. 183 a, b și c sînt reprezentate formele de undă ale curentului redresat sau anodic i_a , tensiunii redresate u_d și tensiunii la bornele rezistenței de sarcină sau limitatoare de curent u_{R_s} .

67. Redresor monofazat mono-alternanță cu sarcină inductivă (L) și f.e.e.m. (E). În fig. 184 este reprezentat un circuit redresor monofazat cu tiratron, având ca sarcină o inductanță (L) și o f.e.e.m. (E). Acest circuit se poate analiza după metoda arătată la § 56, ținând seama că unghiul α_a poate fi mai mare decât unghiul minim de aprindere α_{av} determinat de f.e.e.m.:

$$\sin \alpha_{av} = \frac{E}{U_m}, \quad (67.1)$$

În care U_m este amplitudinea tensiunii de alimentare.

Curentul redresat ($i_d = i_a$). Curentul redresat sau anodic, se poate considera ca la § 56 compus dintr-o componentă (i'_a) datorită tensiunii transformatorului ($u = U_m \sin \omega t$) și o componentă (i''_a) datorită f.e.e.m. E :

$$i_a = i'_a - i''_a; \quad (67.2)$$

$$i_a = \frac{U_m}{\omega L} (-\cos \omega t + \cos \alpha_a) - \frac{E}{\omega L} (\omega t - \alpha_a). \quad (67.3)$$

În fig. 185 se arată aceeași construcție grafică pentru determinarea formei curentului anodic, pentru diferite valori ale f.e.e.m. (E_1, E_2, E_3), la care corespunde diferite componente i''_a ($i''_{a1}, i''_{a2}, i''_{a3}$).

Forme de undă. În fig. 184 și în fig. 185 se văd formele de undă ale curentului redresat i_a , tensiunii redresate u_d și tensiunii la bornele inductanței u_L .

Se remarcă coincidența momentelor când i_a trece prin maximum, u_L prin zero și u_d prin valoarea E ; de asemenea se observă că valoarea medie a lui u_L este nulă.

Oricare ar fi valoarea unghiului de aprindere $\alpha_a > \alpha_{av}$ determinat de tensiunea de comandă a grilei tiratronului, această coincidență se păstrează.

I. Redresoare polifazate

68. Generalități. a) Avantajele redresoarelor polifazate. Pentru redresarea puterilor mari, circuitele redresoare polifazate sînt preferate față de cele monofazate, pentru mai multe motive:

- în majoritatea cazurilor, puterea electrică este produsă și distribuită sub formă de putere trifazată;
- tensiunea redresată a redresoarelor polifazate este mai netedă decât a redresoarelor monofazate, chiar dacă nu se întrebuintează nici un filtru;
- utilizarea transformatoarelor de alimentare și a altor elemente asociate cu acestea este mai bună la anumite circuite polifazate decât la circuitele monofazate.

β) Tipuri de elemente redresoare utilizate în redresoarele polifazate. Redresoarele cu arc de mercur în recipient metalic, cum și ignitroanele și excitroanele, sînt elementele redresoare cele mai potrivite pentru producerea puterilor foarte mari de curent continuu.

Pentru redresarea puterilor mai mici, în special la tensiuni mari și curenți medii sau mici, se întrebuintează adesea și alte tipuri de elemente redresoare. De obicei, pentru astfel de aplicații, se utilizează tuburi cu gaz și tuburi cu vid înalt.

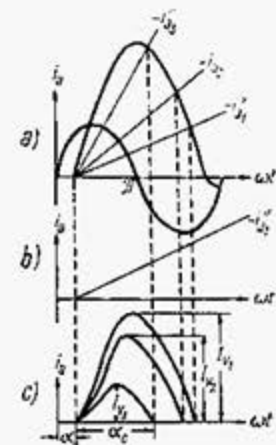


Fig. 185. — Construcție grafică pentru determinarea formei de undă a curentului redresat în cazul circuitului din fig. 184.

γ) Necesitatea transformatorului anodic polifazat. Condițiile optime de redresare nu se realizează uneori decât dacă se dispune de o sursă polifazată, cu un număr de faze mai mare decât trei. În consecință, transformarea numărului de faze, cu ajutorul transformatoarelor, pentru a obține dintr-o sursă de putere trifazată o sursă hexafazată, dodecafazată sau polifazată oarecare, este metoda utilizată în mod curent în circuitele de alimentare în curent alternativ a redresoarelor.

a) Teoria fundamentală a redresării polifazate

(Redresor cu transformator ideal și reactanță infinită în circuitul de sarcină)

69. Schema de principiu a redresorului polifazat. În majoritatea redresoarelor de putere se folosește fie un număr de tuburi mono-anodice cu catodii legați împreună, fie un tub redresor poli-anodic, cu catod comun. Teoria de mai jos se aplică în mod egal în ambele cazuri. Cîteva circuite redresoare speciale nu prezintă caracteristica de catod comun.

În fig. 186 se arată un circuit redresor utilizînd un tub redresor cu trei anodi și o baie de mercur, legat la un transformator cu conexiunea triunghi-stea. Transformatorul, în acest circuit și în cele ce urmează, servește la două scopuri:

- dă tensiunea de alimentare necesară redresării indiferent de tensiunea rețelei de alimentare;
- oferă un punct comun de conexiune pentru întoarcerea curentului de sarcină la diferenții anodi. În toate cazurile trebuie să existe un punct de conexiune comun pentru întoarcerea curentului de sarcină prin bobinajul secundar al transformatorului. Deci acest bobinaj trebuie să aibă totdeauna un punct neutru. Acest punct neutru se folosește ca punct de referință și toate tensiunile sînt date în raport cu el. O excepție la această regulă o constituie conexiunea în punte descrisă la § 110.

70. Ipoteza transformatorului ideal. În cele ce urmează, se vor neglija rezistența și reactanța de scăpări a transformatorului. Din acest motiv, tensiunile anodice se presupun sinusoidale și egale cu tensiunile primare înmulțite cu raportul de transformare al transformatorului. Tensiunile anodice sînt egale cu tensiunile u_{21}, u_{22}, u_{23} — induse în secundarul transformatorului.



Fig. 186. — Schema de principiu a unui redresor trifazat cu conexiune triunghi-stea:
1 — primar; 2 — secundar; 3 — redresor; 4 — reactor de netezire; 5 — sarcină.

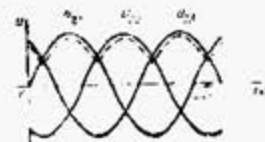


Fig. 187. — Tensiuni de alimentare anodice raportate la punctul neutru al schemei din fig. 186.

71. Forma de undă a tensiunii redresate. În fig. 187 se arată desfășurarea în timp a acestor trei tensiuni anodice, în care se vede că, pe rînd, cîte una din tensiuni face ca unul din anodi să fie la un potențial mai ridicat decât ceilalți. Deoarece această tensiune se consideră raportată la punctul neutru al transformatorului și nu la catodul comun, rezultă că la un moment dat, nu va putea conduce decât un singur anod. Dacă se presupune că pe arc căderea de tensiune este independentă de curent și este aceeași pentru toți anozii, potențialul catodului în raport cu punctul neutru este arătat de curba punctată din fig. 187.

Comutația curentului anodic. Pentru ca doi anodi să poată conduce în același moment, ei trebuie să fie la același potențial. Această egalitate se întâmplă însă numai la momentul corespunzător intersecției curbilor de tensiune din fig. 187. Rezultă că numai un singur anod conduce, și anume acela care la momentul considerat are potențialul cel mai ridicat față de catod. Trecerea arcului de la anod la anod se face în ordinea: 1, 2, 3, 1, 2, 3 etc. Acest transfer al curentului de la anod la anod se numește *comutație*, iar diferența de tensiune $u_{22}-u_{21}$, $u_{23}-u_{22}$ etc., cind este pozitivă se numește *tensiune de comutație*.

72. Influența căderilor de tensiune asupra tensiunii redresate. Pentru simplificare, tensiunea anodului care conduce, raportată la neutrul transformatorului, se va numi în acest paragraf *tensiune redresată*. Notația u'_{d0} reprezintă valoarea instantanee a tensiunii redresate, iar U'_{d0} valoarea medie sau componenta de curent continuu. În cazul redresorului din fig. 186, forma de undă a tensiunii redresate este

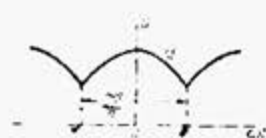


Fig. 188. — Forma de undă a tensiunii redresate la un redresor polifazat.

dată de anvelopa tensiunilor sinusoidale u_{21} , u_{22} , u_{23} din fig. 187. În fiecare moment, această tensiune este mai mare decât tensiunea dintre catod și punctul neutru (arătată punctat), diferența fiind dată de căderea de tensiune pe arc din redresor, care se poate considera aproximativ constantă. Astfel tensiunea redresată definită aici nu este tensiunea reală de la bornele sarcinii, pentru că cuprinde căderea de tensiune pe arc și căderea de tensiune pe reactorul în serie cu sarcina din fig. 186. Totuși definirea tensiunii redresate dată aici simplifică relațiile ce urmează. Tensiunea redresată reală U_d se poate obține din tensiunea redresată de mai sus, ținând seamă de căderea de tensiune pe arc și scăderea de tensiune medie pe rezistența reactorului.

Perioada de conducție la un redresor m -fazăl. Un redresor cu m anodi poate fi legat la un sistem cu m faze în stea, într-un circuit asemănător cu circuitul trifazat din fig. 186. Funcționarea unui astfel de redresor este similară cu a redresorului trifazat, cu excepția că arcu se comută de m ori într-o perioadă, în loc de trei.

Astfel, fiecare anod conduce $\frac{2\pi}{m}$ radianți pe fiecare perioadă: tensiunea de alimentare și tensiunea redresată se compun dintr-o serie de virfuri de sinusoidă, fiecare având această lățime.

73. Tensiunea medie redresată. Tensiunea redresată, în cazul general al unui redresor cu m faze, poate fi dezvoltată în serie Fourier, din care rezultă o componentă de tensiune medie sau continuă și o serie de tensiuni armonice. Deoarece numărul fazelor influențează valoarea lui U'_{d0} cum și mărimea și frecvența tensiunilor armonice, el trebuie să fie luat în considerare la alegerea circuitului redresor. Dacă se alege ca origine a timpului momentul în care tensiunea redresată trece prin maximum, ca în fig. 188, unda de tensiune este atunci o funcție pară, iar în seria Fourier apar numai termenii în cosinus. Dacă se notează cu U_2 valoarea eficace a tensiunilor de fază secundare u_{21} , u_{22} , u_{23} ..., presupuse formind un sistem echilibrat, atunci, relația care dă tensiunea redresată este:

$$u'_{d0} = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t, \quad (73.1)$$

valabilă de la $-\frac{\pi}{m}$ la $+\frac{\pi}{m}$.

Valoarea medie a lui u'_{d0} este:

$$U'_{d0} = \frac{m}{2\pi} \int_{-(\pi/m)}^{+(\pi/m)} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \, d(\omega t) = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{2\pi} \sin \omega t \Big|_{-(\pi/m)}^{+(\pi/m)} \quad (73.2)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\pi/m} \quad (73.3)$$

74. Coeficientul de redresare. Se numește coeficient de redresare raportul:

$$D_r = \frac{U'_{d0}}{U_2} = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (74.1)$$

Expresiile (73.3) și (74.1) sînt valabile pentru orice valoare $m > 1$. La limită, cind $m = \infty$, se obține:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} D_r = \sqrt{2} \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} = \sqrt{2} \quad (74.2)$$

În tabela 10 se arată variația coeficientului de redresare cu numărul fazelor m .

Tabela 10. Coeficientul de redresare la redresoarele polifazate

m	2	3	4	6	12	∞
D_r	0,90	1,17	1,27	1,35	1,40	1,41

75. Valoarea eficace a tensiunii redresate. Folosind relația de definiție a valorii eficace a unei mărimi periodice, se obține:

$$U'_{d0e} = \frac{m}{2\pi} \int_{-(\pi/m)}^{+(\pi/m)} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t)^2 \, d(\omega t) = U_2 \sqrt{1 + \frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m}} \quad (75.1)$$

76. Mărimea armonicilor tensiunii redresate. Dacă U_{dn} reprezintă valoarea eficace a componentei armonice a n -a față de frecvența rețelei de alimentare (adică componenta care are o frecvență de n ori frecvența rețelei) prin analiza Fourier se obține:

$$U_{dn} = \frac{m}{\pi} \int_{-(\pi/m)}^{+(\pi/m)} U_2 \cos \omega t \cos n \omega t \, d(\omega t) \quad (76.1)$$

În această relație s-a luat modulul, deoarece U_{dn} este o valoare eficace pozitivă, pe cind termenul din membrul al doilea al relației este un coeficient al seriei Fourier și poate fi pozitiv sau negativ.

Întregind și înlocuind limitele, se obține:

$$U_{dn} = U_2 \frac{m}{\pi} \left[\frac{\sin \left(\frac{n\pi}{m} \right) \cos \left(\frac{\pi}{m} \right) - \cos \left(\frac{n\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)}{n-1} + \frac{\sin \left(\frac{n\pi}{m} \right) \cos \left(\frac{\pi}{m} \right) + \cos \left(\frac{n\pi}{m} \right) \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)}{n+1} \right] \quad (76.2)$$

Deoarece valoarea cea mai mică a lui n este m , iar valori mai mari ale lui n trebuie să fie multipli de m , în relația (76.2) se poate înlocui $\frac{n}{m}$ prin k în care k este un număr întreg oarecare. Atunci $\sin k\pi = 0$.

Substituind în relația (76.2) k în locul lui $\frac{n}{m}$ se obține:

$$U_{dn} = \left| U_2 \frac{m}{\pi} \cos k\pi \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left(\frac{-1}{n-1} + \frac{1}{n+1} \right) \right| \quad (76.3)$$

$$= \left| -2U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \frac{\cos k\pi}{n^2 - 1} \right|. \quad (76.4)$$

Din relația (76.4) și (73.3) se poate obține amplitudinea armonicii a n -a ($\sqrt{2} U_{dn}$), care, exprimată în raport cu U'_{d0} , este:

$$\frac{\sqrt{2} U_{dn}}{U'_{d0}} = \left| -\frac{2}{n^2 - 1} \cos k\pi \right|. \quad (76.5)$$

Deoarece: $\cos k\pi = \pm 1$, (76.6)

$$\frac{\sqrt{2} U_{dn}}{U'_{d0}} = \frac{2}{n^2 - 1}, \quad (76.7)$$

care este independentă de m . Tabela 11 dă raportul $\frac{\sqrt{2} U_{dn}}{U'_{d0}}$ pentru mai multe valori n .

Tabela 11. Mărimile relative a armoniilor tensiunii redresate

$n = km$	2	3	4	6	8	9	12	18	24
$\frac{\sqrt{2} U_{dn}}{U'_{d0}}$	0,667	0,250	0,133	0,057	0,032	0,025	0,014	0,006	0,0035

Trebuie menționat că aceste tensiuni armonice există numai pentru valori n care sînt multipli de m . De exemplu cînd $m = 6$, atunci n poate avea numai valorile 6, 12, 18, etc.

În orice circuit redresor mono-alternanță armonică întîia sau fundamentală are o pulsație $m\omega$, ω fiind pulsația tensiunii rețelei de alimentare.

O armonică de ordinul n , în sensul arătat aici, are o pulsație $n\omega = km\omega$, care nu poate fi decît un multiplu întreg al pulsației armonicii întîi sau fundamentale.

Mărimile unei tensiuni armonice de o anumită frecvență se vede că este independentă de numărul fazelor, dacă ea este exprimată ca o fracțiune din tensiunea medie redresată.

77. Avantajele unui număr mare de faze. Tabela 10 arată că componenta de curent continuu a tensiunii redresate U'_{d0} crește cu numărul fazelor și că se apropie de valoarea amplitudinii tensiunii anodice $\sqrt{2} U_2$, cînd m tinde spre infinit. Pentru scopuri practice, această tensiune se poate lua egală cu amplitudinea tensiunii anodice, pentru $m = 12$ sau mai mare.

Tabela 11 arată că mărimea tensiunii de ondulație scade iar frecvența sa fundamentală crește, pe măsură ce crește numărul fazelor. De exemplu un redresor

hexafazat are același procent de armonică a șasea, a douăsprezecea sau a optisprezecea ca și un redresor trifazat, dar nu are armonicile a treia, a noua, a cincisprezecea, care există în redresorul trifazat. În consecință, tabelele 10 și 11 arată două avantaje ale numărului mare de faze. Se va vedea mai jos că există și unele dezavantaje.

78. Ipoteza reactorului de inductanță infinită. În general, în serie cu sarcină există totdeauna legată o inductanță sau un reactor de sarcină așa cum este arătat în fig. 186. Acesta este un reactor de netezire și absoarbe majoritatea tensiunii de ondulație, care apare pe sarcină. În unele aplicații, tensiunea de ondulație poate să nu fie dăunătoare. Atunci reactorul poate lipsi. În cazul cînd reactorul există și are o reactanță destul de mare, se poate admite ipoteza unui curent de sarcină constant I_d . Bine înțeles că acest curent de sarcină nu poate fi niciodată riguros constant; în cazul redresoarelor hexa- și decafazate, tensiunea de ondulație este însă foarte mică, astfel încît reactorul necesar pentru a da un curent de sarcină practic constant nu este prea mare sau inacceptabil din punct de vedere economic. Din cauza reactorului, curentul de sarcină se presupune deci constant în analiza de mai jos, indiferent de numărul fazelor redresorului.

79. Forma curenților anodici. Notațiile i_{a1} , i_{a2} , i_{a3} ... vor reprezenta curenții anodici instantanei respectivi.

Din cele spuse mai sus, este evident că dacă se neglijează reactanța de scăpări a transformatorului și dacă curentul de sarcină are valoarea constantă I_d , acești curenți anodici au o valoare constantă I_d pe un interval $\frac{2\pi}{m}$ radiani și sînt nuli în restul perioadei.

80. Valoarea medie a curenților anodici. Fig. 189 arată curenții anodici pentru redresorul trifazat din fig. 186. Se vede că valoarea medie a unui curent anodic este în acest circuit $\frac{I_d}{3}$ sau în general:

$$I_{a \text{ med}} = \frac{I_d}{m}. \quad (80.1) *$$

81. Valoarea eficace a curenților anodici. deci și a curenților prin înfășurarea secundară a transformatorului, este:

$$I_2 = I_a = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_a^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(I_d^2 \frac{2\pi}{m} \right)} = \frac{I_d}{\sqrt{m}}, \quad (81.1)$$

în care i_a poate să fie unul din curenții anodici.

* Este interesant de observat că în cazul lipsei reactorului de netezire, se obține același raport între valoarea eficace a curenților redresat și valoarea eficace a curenților într-o înfășurare secundară a transformatorului:

$$\frac{I_{de}}{I_2} = \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

(În ipoteza de mai sus a reactorului de reactanță infinită este evident că $I_d = I_{dc}$ și relația (81.1) este identică cu cea de mai sus).

Cînd reactorul lipsește și se neglijează reactanța de scăpări a transformatorului curenții anodici are forma unor pulsuri formate din două flancuri drepte (continuare p. 288 jos).

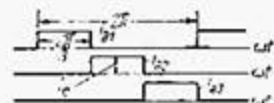


Fig. 189. — Forma de undă a curenților anodici la un redresor trifazat cu reactor de netezire de valoare infinită.

82. Puterea aparentă în secundarul transformatorului. Deoarece pierderile din transformator depind de U_2 , I_2 sau I_a , puterea aparentă necesară a transformatorului nu este egală cu puterea nominală a redresorului și diferă cu numărul de fază m . Produsul $U_2 I_2$ este puterea aparentă nominală pe fază a înfășurării secundare a transformatorului, iar puterea aparentă nominală totală a secundarului transformatorului este:

$$P_2 = m U_2 I_2 = \sqrt{m} U_2 I_d. \quad (82.1)$$

Puterea redresată, inclusiv pierderile din redresor și reactor este dată de relația:

$$P_d = U_{d0} I_d = \sqrt{2} U_2 I_d \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (82.2)$$

83. Factorul de utilizare al secundarului transformatorului este raportul:

$$K_2 = \frac{P_d}{P_2} = \left| \frac{2}{m} \sin \frac{\pi}{m} \right|. \quad (83.1)$$

Acest factor este similar cu factorul de putere dintr-un circuit de putere alternativă, cu excepția că el rezultă dintr-un curent nesinusoidal și nu dintr-un decalaj între o tensiune și un curent sinusoidal. Factorul de utilizare al secundarului atinge o valoare maximă pentru $m = 2,69$. Însă este evident că m nu poate fi decît un număr întreg.

Tabela 12 dă factorul de utilizare al secundarului și inversul lui, pentru diferite valori m . Se vede că pe măsură ce m crește peste valoarea 3, puterea nominală a secundarului transformatorului trebuie să crească pentru aceeași putere redresată necesară, astfel încît transformatorul devine mai costisitor. Acest fapt este unul din principalele dezavantaje ale unui număr mare de faze.

(continuare) și un arc de sinusoidă.

Curentul mediu redresat este atunci:

$$I_d = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} I_{am} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{m}{\pi} I_{am} \sin \left(\frac{\pi}{m} \right),$$

în care I_{am} este amplitudinea curentului anodic.

Valoarea eficace a curentului redresat este:

$$I_{de} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} (I_{am} \cos \omega t)^2 d(\omega t) = \frac{I_{am}}{2} \sqrt{\frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}.$$

Valoarea eficace a curentului anodic (I_a) sau a curentului în înfășurarea secundară a transformatorului este:

$$I_a = I_d = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{+\pi/m} (I_{am} \cos \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_{am}}{2} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{2\pi}{m} + \frac{2\pi}{m} \right)}.$$

Din ultimile două relații rezultă $\frac{I_{de}}{I_a} = \sqrt{m}$.

Tabela 12. Factorul de utilizare al înfășurării secundare a transformatorului

m	2	3	4	6	12
K_2	0,636	0,675	0,636	0,561	0,399
$K'' = \frac{1}{K_2}$	1,57	1,48	1,57	1,81	2,5

84. Factorul de utilizare al primarului transformatorului se definește analog cu (83.1):

$$K_1 = \frac{P_d}{P_1} = \frac{U_{d0} I_d}{m_1 U_1 I_1}, \quad (84.1)$$

în care: U_1 este valoarea eficace a tensiunii pe o înfășurare primară a transformatorului;

I_1 — valoarea eficace a curentului în înfășurarea primară;

m_1 — numărul de înfășurări primare ($m_1 = 3$).

Din (83.1) și (84.1) rezultă:

$$K_1 = \frac{m U_2 I_2}{m_1 U_1 I_1} K_2. \quad (84.2)$$

Pentru calculul factorului K_1 trebuie cunoscută valoarea eficace a curentului I_1 . Aceasta depinde de raportul de transformare și de forma curentului, care, la rîndul ei, depinde de forma conexiunii întrebuințate în primarul și secundarul transformatorului. Factorul K_1 se poate calcula cu datele cuprinse în tabela 13, aplicînd formula (84.1).

85. Puterea de calcul a transformatorului anodic. S-au obținut mai sus două puteri aparente diferite în primarul și secundarul transformatorului anodic:

$$P_1 = K' P_d, \quad (85.1)$$

$$P_2 = K'' P_d. \quad (85.2)$$

Deosebirea dintre aceste puteri provine din faptul că forma de undă a curentului în primar și secundar fiind diferite sînt diferite și puterile fictive (reactive și deformante) corespunzătoare. Puterile reale sînt aproape egale în ambele înfășurări, cu aproximația pierderilor din transformator.

Problema regimului deformant în redresorul polifazat se va examina la subcapitolul K.

Se obișnuiește în general să se proiecteze transformatorul la o putere de calcul, care se ia în mod empiric ca medie a puterilor aparente:

$$P_t = \frac{P_1 + P_2}{2}. \quad (85.3)$$

86. Avantajele conexiunilor speciale. Toate rezultatele obținute mai sus implică presupunerea că bobinajele secundare ale transformatorului sînt legate în stea. Utilizînd conexiuni speciale, majoritatea avantajelor care decurg atît dintr-un număr mare cit și dintr-un număr mic de faze, pot fi obținute simultan. De exemplu, în conexiunea triunghi-dublă stea, care se va examina mai jos, tensiunea de undulație este egală cu a unui redresor hexafazat cu conexiunea secundarului în stea, și totuși factorul de utilizare este egal cu al unui redresor trifazat.

87. Conexiuni uzuale trifazate și hexafazate. În tabela 13 sînt trecute conexiunile uzuale trifazate și hexafazate. Se arată mărimea principale în ipoteza unui

Tabela 13. Conexiuni uzuale și mărimi fundamentale la redresoarele trifazate

Denumirea circuitului redresor	Schemă conexiunii	Diagrama vectorială	Tensiunea pe o înfășurare secundară, (valoarea eficace) U_2	Tensiunea inversă de vîrf U_{d0}
Monofazat dublă-alternanță			$U_2 = 1,11 U'_{d0}$	$3,1 U'_{d0}$
Bifazat mono-alternanță			$U_2 = 1,11 U'_{d0}$	$3,1 U'_{d0}$
Monofazat în punte (Graetz)			$U_2 = 1,11 U'_{d0}$	$1,57 U'_{d0}$
Trifazat stea-stea			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$ ($U_1 = 1,48 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$
Trifazat triunghi-stea			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$ ($U_1 = 1,48 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$
Trifazat stea-stea zig-zag			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$ ($U'_2 = 0,49 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$

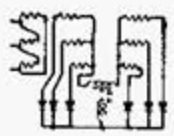
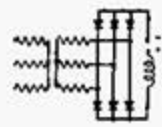
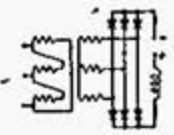
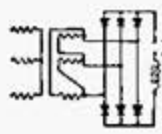
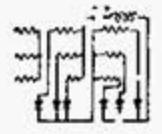
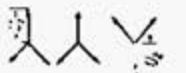
și hexafazate (transformator ideal și inductanță infinită în circuitul de sarcină)

Curentul anodic			Curentul în înfășurarea secundară	
Forma	Valoarea medie $I_a \text{ med}$	Valoarea eficace I_a	Forma	Valoarea eficace I_2
	$0,5 I_d$	$0,71 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,5 I_d$	$0,71 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,5 I_d$	$0,71 I_d$		I_d
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$	La fel cu cel anodic	

Denumirea circuitului redresor	Schema conexiunii	Diagrama vectorială	Tensiunea pe o înfășurare secundară (valoarea eficace) U_2	Tensiunea inversă de vîrf U_v
Trifazat triunghi-stea zig-zag			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$ ($U'_2 = 0,59 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat stea-stea			$U_2 = 0,74 U'_{d0}$	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat triunghi-stea			$U_2 = 0,74 U'_{d0}$	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat stea-stea în furcă			$U_2 = 0,74 U'_{d0}$ ($U'_2 = 0,43 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat triunghi-stea în furcă			$U_2 = 0,74 U'_{d0}$ ($U'_2 = 0,53 U'_{d0}$)	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat stea- cubă stea cu transformator interfază			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$	$2,1 U'_{d0}$

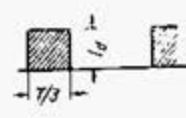
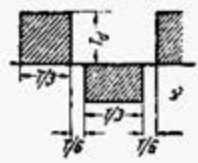
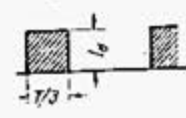
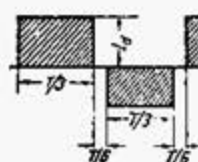
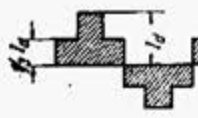
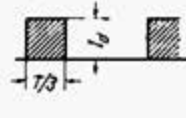
Tabela 13 (continuare)

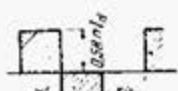
Curentul anodic			Curentul în înfășurarea secundară	
Forma	Valoarea medie $I_{a med}$	Valoarea eficace I_a	Forma	Valoarea eficace I_2
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,167 I_d$	$0,41 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,167 I_d$	$0,41 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,167 I_d$	$0,41 I_d$		$0,41 I_d$ în bobina- jul exterior $0,58 I_d$ în bobina- jul interior
	$0,167 I_d$	$0,41 I_d$		$0,41 I_d$ în bobina- jul exterior $0,58 I_d$ în bobina- jul interior
	$0,167 I_d$	$0,29 I_d$	La fel cu cel anodic	

Denumirea circuitului redresor	Schima conexiunii	Diagrama vectorială	Tensiunea pe o înfășurare secundară (valoarea eficace) U_2	Tensiunea inversă de vîrf U'_0
Hexafazat triunghi-dublă stea cu transformator interfață			$U_2 = 0,855 U'_{d0}$	$2,1 U'_{d0}$
Hexafazat stea în punte (Larionov)			$U_2 = 0,71 U'_{d0}$	$1,05 U'_{d0}$
Hexafazat triunghi stea în punte (Larionov)			$U_2^{(1)} = 0,74 U'_{d0}$	$1,05 U'_{d0}$
Hexafazat stea-dublă stea în punte (Larionov)			$U_2 = 0,74 U'_{d0}$	$1,05 U'_{d0}$
Hexafazat stea-dublă stea în serie (Vologdin)			$U_2 = 0,13 U'_{d0}$	$1,05 U'_{d0}$

¹⁾ În cazul acestui montaj, prin U_2 s-a notat tensiunea între faze.

Tabela 13 (continuare)

Curentul anodic			Curentul în înfășurarea secundară	
Forma	Valoarea medie $I_a \text{ med}$	Valoarea eficace I_a	Forma	Valoarea eficace I_2
	$0,167 I_d$	$0,29 I_d$	La fel cu cel anodic	
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$		$0,82 I_d$
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$		$0,82 I_d$
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$		$0,47 I_d$
	$0,33 I_d$	$0,58 I_d$	La fel cu cel anodic	$0,58 I_d$

Denumirea circuitului redresor	Curentul în înfășurarea primară		Curentul de linie	
	Forma	Valoarea eficace I_1	Forma	Valoarea eficace I_l
Monofazat dublă- alternanță		nI_d	Ca în înfășurarea primară	
Bifazat mono- alternanță		nI_d	Ca în înfășurarea primară	
Monofazat în punte (Graetz)		nI_d	Ca în înfășurarea primară	
Trifazat stea-stea		$0,47 nI_d$	Ca în înfășurarea primară	
Trifazat triunghi-stea		$0,47 nI_d$		$0,81 nI_d$
Trifazat stea-stea zig-zag		$0,47 nI_d$ $\left(n \cdot \frac{U_2}{U} = \sqrt{3} \frac{U_2}{U} \right)$	Ca în înfășurarea primară	

Raport de transformare: $n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}$ (U_2 și U_1 sînt indicate în diagramele vectoriale)

Tabela 13 (continuare)

Puterea aparentă			Componenta armonică a tensiunii redresate		Amperepire de preîncalzire
a secundarului P_2	a primarului P_1	de calcul a transformatorului P	Frecvența la $f = 50$ Hz	Amplitudinea primei armonici (fundamentalei)	
$1,57 P_d$	$1,11 P_d$	$1,31 P_d$	100	$0,67 U'_{d0}$	nu există
$1,57 P_d$	$1,11 P_d$	$1,31 P_d$	100	$0,67 U'_{d0}$	$0,5 w_2 I_d$
$1,11 P_d$	$1,11 P_d$	$1,11 P_d$	100	$0,67 U'_{d0}$	nu există
$1,48 P_d$	$1,21 P_d$	$1,35 P_d$	150	$0,25 U'_{d0}$	$0,33 w_2 I_d$
$1,48 P_d$	$1,21 P_d$	$1,35 P_d$	150	$0,25 U'_{d0}$	$0,33 w_2 I_d$
$1,71 P_d$	$1,21 P_d$	$1,46 P_d$	150	$0,25 U'_{d0}$	nu există

¹⁾ Prin f se înțelege frecvența rețelei.

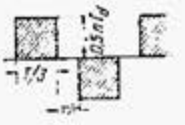
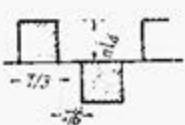
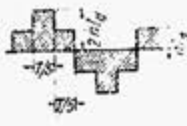
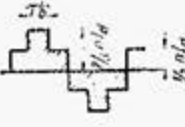
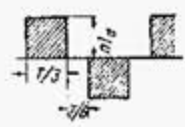
Denumirea circuitului redresor	Curentul în înfășurarea primară		Curentul de linie	
	Forma	Valoarea efectivă I_1	Forma	Valoarea efectivă I_l
Trifazat triunghi- stea zig-zag		$0,47 n I_d$		$0,81 n I_d$
Hexafazat stea-stea		$0,17 n I_d$ $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \right)$	Ca în înfășurarea primară	
Hexafazat triunghi-stea		$0,58 n I_d$		$0,81 n I_d$
Hexafazat stea-stea în furcă		$0,47 n I_d$ $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1} \right)$	Ca în înfășurarea primară	
Hexafazat triunghi-stea în furcă		$0,47 n I_d$		$0,81 n I_d$
Hexafazat stea-dublu stea cu transformator interfază		$0,11 n I_d$	Ca în înfășurarea primară	

Raport de transformare $n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}$ (U_2 și U_1 sînt indicate în diagramele vectoriale).

Tabela 13 (continuare)

Puterea aparentă			Componenta armonică a tensiunii redresate		Amperajul de preîncălzire
a secundarului P_2	a primarului P_1	de calcul a transformatorului P	Frecvența la $f = 50$ Hz	Amplitudinea primei armonici (fundamentalei)	
$1,71 P_d$	$1,21 P_d$	$1,46 P_d$	150	$0,25 U'_{d0}$	nu există
$1,81 P_d$	$1,05 P_d$	$1,43 P_d$	300	$0,057 U'_{d0}$	$0,23 w_2 I_d$ ($f = 150$ Hz)
$1,81 P_d$	$1,28 P_d$	$1,55 P_d$	300	$0,057 U'_{d0}$	nu există
$1,79 P_d$	$1,05 P_d$	$1,42 P_d$	300	$0,057 U'_{d0}$	nu există
$1,79 P_d$	$1,05 P_d$	$1,42 P_d$	300	$0,057 U'_{d0}$	nu există
$1,48 P_d$	$1,05 P_d$	$1,26 P_d$	300	$0,057 U'_{d0}$	nu există

¹⁾ Prin f se înțelege frecvența rețelei.

Denumirea circuitului redresor	Curentul în înfășurarea primară		Curentul de linie	
	Forma	Valoarea efectivă I_1	Forma	Valoarea efectivă I
Hexafazat triunghi-dublă stea cu transformator interloz		$0,41 nI_d$		$0,71 nI_d$
Hexafazat stea-stea în punte (Larionov)		$0,82 nI_d$		$0,82 nI_d$
Hexafazat triunghi-stea în punte (Larionov)		$0,82 nI_d$		$1,41 nI_d$
Hexafazat stea-triunghi în punte (Larionov)		$0,47 nI_d$ $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = 1,3 \frac{U_2}{U_1}\right)$	Ca în înfășurarea primară	
Hexafazat stea-dublă stea în serie (Vologdin)		$0,82 nI_d$ $\left(n = \frac{U_2}{U_1} = 1,3 \frac{U_2}{U_1}\right)$	Ca în înfășurarea primară	

Raport de transformare $n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$ (U_2 și U_1 sînt indicate în diagramele vectoriale).

Tabela 13 (continuare)

Puterea aparentă			Componenta armonică a tensiunii redresate		Amperspire de preînmagnetizare
a secundarului P_2	a primarului P_1	de calcul a transformatorului P	Frecvența la $f = 50$ Hz	Amplitudinea primei armonici (fundamentalei)	
$1,18 P_d$	$1,05 P_d$	$1,26 P_d$	300	$0,057 U_{d0}$	nu există
$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	300	$0,057 U_{d0}$	nu există
$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	300	$0,057 U_{d0}$	nu există
$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	$1,05 P_d$	300	$0,057 U_{d0}$	nu există
$1,49 P_d$	$1,05 P_d$	$1,37 P_d$	300	$0,057 U_{d0}$	nu există

*) Prin f se înțelege frecvența rețelei.

transformator ideal (cu impedanța de scurtcircuit nulă) și a unui reactor cu inductanță infinită în circuitul de sarcină.

Primele trei conexiuni din tabelă au fost introduse cu titlu de comparație. Deși valorile din tabelă sunt calculate în ipoteza unor condiții ideale, ele nu diferă mult de valorile întâlnite în condiții reale; aproximația este cu atât mai bună, cu cât numărul fazelor este mai mare.

Componenta armonică a tensiunii redresate indicată în tabelă se înțelege la bornele ansamblului sarcină-reactor; tensiunea de ondulație la bornele rezistenței de sarcină este nulă în ipoteza unui reactor de netezire cu inductanță infinită.

Proprietățile principalelor conexiuni din această tabelă se vor discuta în § 101-110 în legătură cu transformatorul real.

b) Teoria aproximativă a redresorului polifazat cu transformator real

88. *Efectul reacției de scăpări a transformatorului.* Când se neglijează inductanța de scăpări a transformatorului, un rezultat imediat al analizei aproximative de mai sus este că arcul trece instantaneu de la un anod la următorul. Această comutație a curentului, în aparență instantanee, ar trebui să fie urmată de o viteză de variație a curentului anodic în bobinajul secundar al transformatorului infinită, ceea ce, bine înțeles, este imposibil din punct de vedere fizic. De aceea, este necesară o analiză mai exactă a efectului inductanței de scăpări a transformatorului asupra curentului și tensiunii anodice și asupra tensiunii redresate. În cele ce urmează, inductanța de scăpări echivalentă a transformatorului se consideră concentrată în serie cu bornele anozilor. Valoarea acestei inductanțe depinde, bine înțeles, de tipul de conexiune a transformatorului. Se va considera mai întâi un transformator legat în stea cu m faze, iar rezultatele ce se vor obține se vor modifica în paragrafele următoare, pentru a se putea aplica și la alte conexiuni. În orice tip de conexiune a transformatorului, inductanța care se consideră în calcule este aceea ce corespunde la *reacțanța de comutație* definită ca reacțanța care se opune în mod efectiv la transferul normal al curentului între două elemente redresoare, care conduc succesiv. În teorie, când se neglijează inductanța de scăpări a transformatorului, numai un anod conduce la un moment dat și curentul scade brusc la zero — la sfârșitul perioadei de conducție.

89. *Perioada de comutație.* Într-un circuit real, care are inductanță de scăpări, curentul anodic trebuie să scadă treptat la zero, la sfârșitul perioadei de conducție. Dacă pe de altă parte, un reactor de sarcină avind o inductanță destul de mare menține curentul de sarcină constant, curentul unui anod trebuie să crească concomitent cu scăderea curentului pe anodul vecin, astfel, încât suma acestor doi cureni să fie în orice moment egală cu curentul de sarcină. În modul acesta, există o *perioadă de suprapunere* sau *comutație* între perioadele de conducție a doi anodi vecini. Pe de altă parte, deoarece cei doi anodi conduc simultan, iar căderea de tensiune pe arc se presupune constantă, potențialele celor doi anodi în timpul perioadei de comutație sunt egale între ele și au valoarea tensiunii redresate u_d . Apare deci un scurtcircuit la bornele celor două bobinaje secundare, care alimentează anozii ce se află în comutație.

Fig. 190 arată un redresor trifazat, legat în stea, în care anozii 1 și 2 conduc simultan. Relațiile de mai jos se referă exclusiv la acest tip de conexiune. Rezultatele calculului ce urmează se pot utiliza și la studiul altor conexiuni, dacă ecuațiile

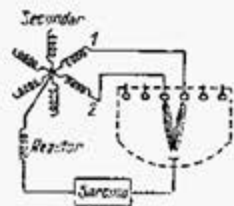


Fig. 190. — Conducție simultană pe doi anodi în timpul perioadei de comutație.

obținute se interpretează corect. Dacă l este inductanța de scăpări echivalentă pe fază a transformatorului, raportată la secundar, adică inductanța măsurată la bornele unui bobinaj secundar cu toate celelalte bobinaje secundare deschise, iar bobinajul primar fiind în scurtcircuit, atunci tensiunea redresată este:

$$u_d' = u_{21} - l \frac{di_{a1}}{dt} = u_{22} - l \frac{di_{a2}}{dt}, \quad (89.1)$$

relație valabilă în timpul perioadei de comutație.

90. Scăderea tensiunii redresate în timpul comutației.

Deoarece:

$$i_{a1} + i_{a2} = I_d = \text{const.}, \quad (90.1)$$

$$\frac{di_{a1}}{dt} + \frac{di_{a2}}{dt} = 0. \quad (90.2)$$

Combinând relația (89.1) și (90.2), se obține:

$$2u_d' = u_{21} + u_{22} - l \left(\frac{di_{a1}}{dt} + \frac{di_{a2}}{dt} \right) = u_{21} + u_{22}, \quad (90.3)$$

sau:

$$u_d' = \frac{u_{21} + u_{22}}{2}. \quad (90.4)$$

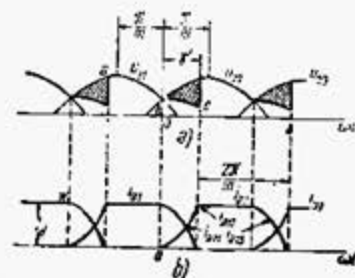


Fig. 191. — Forma de undă a curentilor și tensiunilor într-un redresor polifazat cu luarea în considerare a fenomenului de comutație.

Rezultă că tensiunea redresată în timpul perioadei de comutație este media tensiunilor instantanee a celor două faze.

Fig. 191a, arată această situație pentru cazul particular $m = 3$. În regiunea $a-b$ tensiunea u_{21} este mai mare decât u_{22} și anodul 1 conduce singur. Deoarece curentul este continuu, tensiunea redresată este egală cu u_{21} . Când u_{22} devine egal cu u_{21} în punctul b , anodul 2 începe să conducă. În regiunea $b-c$, curentul anodului 1 descresce, cum se arată în fig. 191b, iar curentul anodului 2 crește. Tensiunea redresată este trasată ca media tensiunilor u_{21} și u_{22} . În punctul c , curentul anodului 1 devine zero, curentul anodului 2 devine egal cu I_d , iar tensiunea redresată crește brusc de la $\frac{u_{21} + u_{22}}{2}$ la u_{22} .

Această reducere a valorii instantanee a tensiunii redresate în timpul perioadei de comutație face să scadă valoarea medie a tensiunii redresate. Mărimea acestei scăderi depinde de timpul cât durează comutația sau de unghiul de comutație γ , reprezentat în fig. 191.

91. *Determinarea unghiului de comutație sau de suprapunere.* Pentru a găsi valoarea lui γ și influența sa asupra tensiunii redresate medii, este necesar să se determine mai întâi momentul când curentul i_a devine nul. Din relația (89.1) se obține:

$$\frac{di_{a1}}{dt} - \frac{di_{a2}}{dt} = \frac{u_{21} - u_{22}}{l}. \quad (91.1)$$

Folosind ecuația (90.2) se obține:

$$\frac{di_{a1}}{dt} = \frac{u_{21} - u_{22}}{2l}. \quad (91.2)$$

Dacă drept origine de timp se socotește momentul de începere a perioadei de comutație, punctul b în fig. 191, tensiunea u_{21} și u_{22} se pot exprima sub forma:

$$u_{21} = \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right) = \quad (91.3)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \left(\cos \omega t \cos \frac{\pi}{m} - \sin \omega t \sin \frac{\pi}{m} \right); \quad (91.4)$$

$$u_{22} = \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) = \quad (91.5)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \left(\cos \omega t \cos \frac{\pi}{m} + \sin \omega t \sin \frac{\pi}{m} \right), \quad (91.6)$$

din care rezultă:

$$\frac{u_{21} - u_{22}}{2} = -\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \omega t. \quad (91.7)$$

Substituind relația (91.7) în relația (91.2) rezultă:

$$\frac{di_{a1}}{dt} = -\frac{\sqrt{2} U_2}{l} \sin \frac{\pi}{m} \sin \omega t, \quad (91.8)$$

din care:

$$i_{a1} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega l} \sin \frac{\pi}{m} \cos \omega t + C, \quad (91.9)$$

în care C este o constantă de integrare. Când $t = 0$, $i_{a1} = I_d$. Înlocuind această condiție, se obține pentru C :

$$C = I_d - \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega l} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (91.10)$$

Factorul ωl este reactanța de scăpări echivalentă a transformatorului, la frecvența fundamentală, raportată la secundar. Înlocuind valoarea lui C și notînd această reactanță cu X_2 în ecuația (91.9) se obține:

$$i_{a1} = I_d - \frac{\sqrt{2} U_2}{X_2} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) (1 - \cos \omega t) \quad (91.11)$$

și fiindcă din (90.1):

$$i_{a1} + i_{a2} = I_d, \quad (91.12)$$

$$i_{a2} = I_d - i_{a1} = \frac{\sqrt{2} U_2}{X_2} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) (1 - \cos \omega t). \quad (91.13)$$

Acum se poate găsi valoarea lui γ înlocuind pe ωl cu γ și punînd $i_{a1} = 0$ în expresia (91.11). Astfel:

$$1 - \cos \gamma = \frac{I_d X_2}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (91.14)$$

Combinînd relația (91.14) cu (91.11) și (91.13), se obține:

$$i_{a1} = I_d \left(1 - \frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \gamma} \right); \quad (91.15)$$

$$i_{a2} = I_d \left(\frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \gamma} \right). \quad (91.16)$$

92. Tensiunea redresată medie în cazul comutației. Din cauza suprapunerii valorii, tensiunea redresată este redusă de la valoarea medie a anvelopei unei sinusoide, cu valoarea medie a diferenței de tensiune arătată de porțiunea hașurată din fig. 191a. Această diferență în timpul comutației este dată de:

$$u_{22} - u_d' = \frac{u_{22} - u_{21}}{2} = \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \omega t, \quad (92.1)$$

iar valoarea ei medie pe perioada de conducție a unui anod, care este egală cu valoarea ei medie pe orice număr de perioade de conducție — deoarece undulațiile de tensiune sînt aceleași pe orice perioadă — este:

$$\frac{m}{2\pi} \int_0^\gamma (u_{22} - u_d') d(\omega t) = \frac{m}{2\pi} \int_0^\gamma \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \omega t d(\omega t) = \quad (92.2)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left(\frac{1 - \cos \gamma}{2} \right). \quad (92.3)$$

Valoarea medie a tensiunii redresate, dată de relația (73.3) în lipsa comutației, se reduce din cauza comutației, cu mărirea arătată în relația (92.3). Deci tensiunea redresată medie cu considerarea comutației, este:

$$U_d' = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left(1 - \frac{1 - \cos \gamma}{2} \right) = \quad (92.4)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos^2 \frac{\gamma}{2}. \quad (92.5)$$

Dacă valoarea $(1 - \cos \gamma)$ din relația (91.14) se folosește în relația (92.4), se obțin și următoarele expresii pentru U_d' :

$$U_d' = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left(1 - \frac{I_d X_2}{2 \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}} \right) = \quad (92.6)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} - \frac{m}{\pi} \frac{I_d X_2}{2}, \quad (92.7)$$

$$= U_{d0}' - \frac{m}{\pi} \frac{I_d X_2}{2} \quad (92.8)$$

în care U_{d0}' este tensiunea redresată în gol sau când unghiul de comutație γ este nul. Expresia (92.8) arată că tensiunea redresată medie scade liniar, când curentul de sarcină crește. Tensiunea reală la bornele redresorului U_d (adică tensiunea pe reactor + rezistența de sarcină) se obține scăzînd din această valoare căderea de tensiune pe arc.

93. Valoarea eficace a curentului anodic în cazul comutației. Valoarea eficace a curentului anodic este și ea influențată de unghiul de comutație. Pentru calculul acestei valori, curentul anodic poate fi împărțit în trei părți:

1) i_{a11} care este curentul în timpul perioadei de creștere și este dat de ecuația (91.16):

2) i_{a12} — care este egal cu I_d și este porțiunea orizontală a unei din fig. 191b:

3) i_{a13} — care este curentul în timpul perioadei de scădere și este dat de ecuația (91.15).

Valoarea medie a pătratelor curentului anodic este:

$$I_a^2 = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^\gamma i_{a11}^2 d(\omega t) + \int_\gamma^{2\pi/m} i_{a12}^2 d(\omega t) + \int_{2\pi/m}^\gamma i_{a13}^2 d(\omega t) \right] \quad (93.1)$$

În care limitele integralei a treia sînt astfel alese, încît ecuația (91.15) să poată fi utilizată pentru i_{a13} fără a schimba originea timpului. Înlocuind valorile: i_{a11} , i_{a12} , i_{a13} și făcînd simplificările, se obține:

$$I_a^2 = \frac{I_d^2}{m} - \frac{I_d^2}{\pi} \int_0^\gamma \left[\frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \gamma} - \left(\frac{1 - \cos \omega t}{1 - \cos \gamma} \right)^2 \right] d(\omega t) \quad (93.2)$$

După integrare și extragerea rădăcinii, se obține valoarea eficace a curentului anodic:

$$I_a = \frac{I_d}{\sqrt{m}} \sqrt{1 - m \psi(\gamma)} \quad (93.3)$$

În care:

$$\psi(\gamma) = \frac{(2 + \cos \gamma) \sin \gamma - (1 + 2 \cos \gamma) \gamma}{2\pi(1 - \cos \gamma)^2} = \quad (93.4)$$

$$= \frac{2\gamma}{15\pi} \left(1 + \frac{\gamma^2}{84} + \dots \right). \quad (93.5)$$

94. Recapitularea formulelor privind efectul reactanței de scăpări. Efectul reactanței de scăpări a transformatorului într-un redresor polifazat cu conexiune secundară în stea se poate vedea acum în ansamblu din expresiile (92.5), (92.6) și (93.3), care se repetă aici:

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left[\cos^2 \frac{\gamma}{2} \right]; \quad (94.1)$$

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{m} \right) \left[1 - \frac{I_d X_2}{2 \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}} \right]; \quad (94.2)$$

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} - \left[\frac{m}{\pi} \frac{I_d X_2}{2} \right]; \quad (94.3)$$

$$I_a = \frac{I_d}{\sqrt{m}} [\sqrt{1 - m \psi(\gamma)}], \quad (94.4)$$

În care, din relațiile (91.14) și (93.5):

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_d X_2}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}; \quad (94.5) \quad \psi(\gamma) = \frac{2\gamma}{15\pi} \left(1 + \frac{\gamma^2}{84} + \dots \right). \quad (94.6)$$

În expresiile (94.1), (94.2), (94.3) și (94.4) parantezele pătrate cuprind un factor care arată că efectul inductanței sau al reactanței de scăpări a transformatorului se produce prin apariția unor factori de corecție care se aplică rezultatelor analizei simplificate precedente.

95. Discuția efectelor reactanței de scăpări a transformatorului. Din relația (94.3) rezultă că deși tensiunea în gol crește cu m , reglajul în tensiune al redresorului crește și el. Pentru aceeași reactanță a transformatorului, scăderea tensiunii cu curentul de sarcină este direct proporțională cu valoarea lui m . În general această scădere este supărătoare.

Relația (94.4) arată că pentru același curent de sarcină, reactanța transformatorului face să scadă valoarea eficace a curentului anodic, cu factorul $\sqrt{1 - m \psi(\gamma)}$. Pentru a arăta mărimea acestei reduceri, fig. 192 dă unghiul de

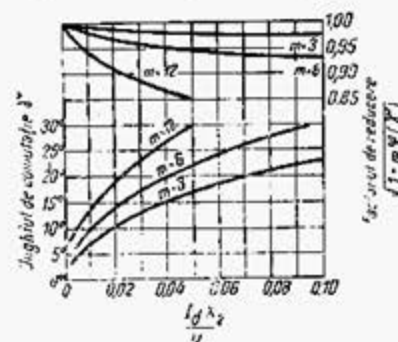


Fig. 192 — Variația unghiului de comutație și a factorului de reducere cu sarcina redresorului.

comutație γ și factorul de reducere $\sqrt{1 - m \psi(\gamma)}$ trasate în funcție de $\frac{I_d X_2}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}$ pentru

mai multe valori ale lui m . Valoarea lui γ la plină sarcină este în general aproxi-

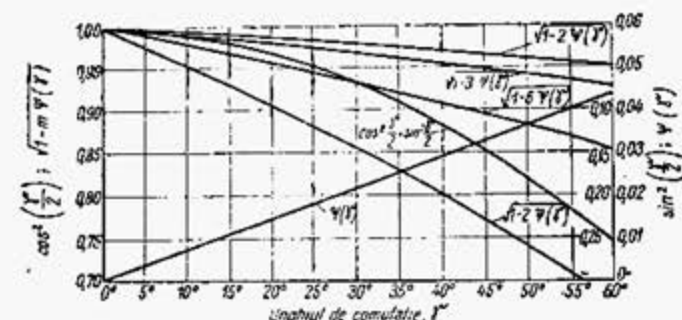


Fig. 193. — Diagrama de variație a diversilor factori de corecție introduși de fenomenul de comutație.

Cînd $m = 12$ efectul este mult mai mare. Însă o astfel de situație este rar întâlnită în conexiuni dodecafazate — utilizate în practică — deoarece ele nu sînt de tipul stea.

În fig. 193 se arată variația cu unghiul de comutație a expresiilor $\psi(\gamma)$, $\sqrt{1 - m \psi(\gamma)}$, $\sin^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)$ și $\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)$.

96. Cazul conducerii simultane pe mai mult decât doi anodi. În discuția de mai sus a efectului reacției transformatorului, s-a presupus că pot conduce cel mult doi anodi la un moment dat. Această presupunere este valabilă pentru majoritatea redresoarelor funcționând sub încărcarea lor normală. Totuși, pentru suprasarcini foarte mari, poate să intre în funcțiune un al treilea anod, înainte de încetarea conducerii pe ceilalți doi. Această situație se întâmplă mai de vreme pentru valori mari ale lui m , deoarece atunci unghiul de comutație este mai mare și perioada de conducție mai mică.

Cînd doi sau mai mulți anodi conduc în același timp, relațiile (90.4) și (94.3) nu mai sînt valabile și trebuie deduse ținînd seamă de noua condiție.

Deoarece majoritatea redresoarelor pot funcționa la suprasarcini destul de mari fără ca să conducă mai mult decît doi anodi simultan, se renunță la discutarea acestui caz de funcționare, care se poate găsi tratat în literatura de specialitate.

c) Curenții în transformatoarele redresoarelor

97. Generalități. Pentru a furniza putere unui redresor polifazat de la o sursă trifazată se pot folosi trei transformatoare monofazate sau un transformator trifazat tip simbur sau manta. În anumite condiții, aceste transformatoare dau rezultate diferite. Pe lângă aceasta, conexiunile folosite pentru bobinajele primare influențează funcționarea redsorelor.

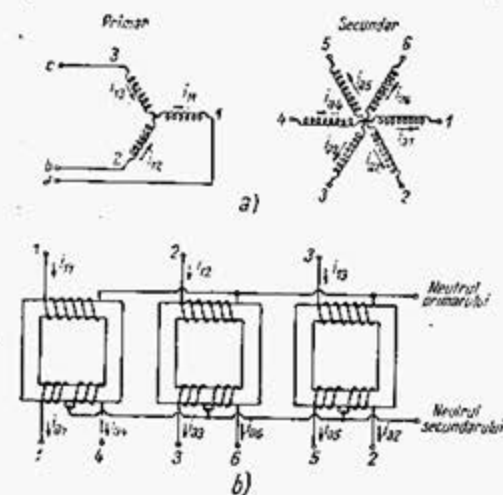


Fig. 191. — Conexiunea stea-stea a trei transformatoare monofazate;
a — schema de principiu; b — conexiunile.

trului adevărat al sistemului. Pentru a simplifica analiza curenților din bobinajele primare, se presupune mai jos că reluctanța miezului este neglijabil de mică. Această ipoteză echivalează cu a spune că fluxul necesar poate fi creat de un curent de excitație sau de magnetizare neglijabil. Sensurile convenționale pozitive ale curenților în bobinajele situate pe miezul unui transformator unic, așa cum se arată în fig. 194, sau pe o coloană a unui transformator polifazat, ca cel arătat în fig. 195 sau 196, se presupun astfel alese, încît sensurile pozitive ale curen-

ților magnetizează miezul în sensuri opuse. Analiza de mai jos se limitează la o sursă trifazată, pentru că acesta este cazul cel mai important. Se presupune că se folosesc numai trei bobinaje primare și că acestea sînt legate în triunghi sau stea; există însă cîteva circuite redresoare, în care conexiunile primare sînt mult mai complicate.

α) Curentul secundar echivalent. În multe redresoare, la un bobinaj primar corespund mai multe bobinaje secundare, adică mai multe bobinaje secundare sînt așezate pe fiecare coloană a miezului transformatorului, dacă este un transformator trifazat, sau pe fiecare transformator — dacă se folosesc trei transformatoare monofazate. În unele conexiuni, fiecare bobinaj secundar poartă curentul corespunzător unui anod. În alte conexiuni, mai multe bobinaje secundare poartă o combinație a curenților mai multor anodi. Dacă curentul în fiecare bobinaj secundar se raportează la primar și dacă toți curenții raportați din bobinajele unei anumite faze se adună, această sumă poate fi numită „curentul secundar echivalent” al acelei faze. Dacă nici bobinajele primare, nici cele secundare, nu poartă o componentă de curent continuu, ca, de exemplu, în circuitele liniare în care tensiunile aplicate sînt pur alternative, acest curent secundar echivalent este egal cu curentul de sarcină corespunzător curentului primar. Dar, după cum se va vedea mai departe, această condiție nu este întotdeauna îndeplinită, într-un circuit redresor, deoarece curentul secundar echivalent poate să conțină și o componentă de curent continuu.

În general, în orice circuite, curentul secundar echivalent este curentul care trece prin bobinajul primar, produce o forță magnetomotoare egală și de sens opus cu aceea produsă de toți curenții secundari, acționînd împreună în bobinajele lor respective. De exemplu, bobinajele 1 și 2 din secundarul arătat în fig. 194a aparțin fazei 1 — și curenții lor tind să magnetizeze miezul în sensuri opuse.

Astfel, curentul secundar echivalent pentru faza 1 este $\frac{w_2}{w_1} (i_{a1} - i_{a4})$, unde $\frac{w_2}{w_1}$ este raportul numărului de spire din fiecare bobinaj secundar și primar. Analog, curentul secundar echivalent pentru faza 2 este $\frac{w_2}{w_1} (i_{a3} - i_{a6})$ și pentru faza 3 este $\frac{w_2}{w_1} (i_{a5} - i_{a2})$. Curenții în bobinajele primare din fazele 1, 2 și 3, se notează cu i_{11} , i_{12} și i_{13} respectiv, iar numărul de spire al oricărui bobinaj primar este w_1 . Deoarece transformatorul se utilizează la alimentarea unui redresor, cei trei curenți secundari echivalenți pot să cuprindă atât componente continue cît și alternative. Din acest motiv, curentul secundar echivalent pe faza 1 se notează $i_{s1} + I_{s0}$, în care i_{s1} este componenta alternativă a acestui curent și I_{s0} componenta continuă. Curenții secundari echivalenți pentru fazele 2 și 3 sînt $i_{s2} + I_{s0}$ și $i_{s3} + I_{s0}$ respectiv. Același simbol I_{s0} se folosește să indice componenta continuă a acestor trei curenți, deoarece în toate circuitele redresoare obișnuite comportarea celor trei faze este similară, iar cei trei curenți secundari echivalenți diferă numai prin aceea că fazele componentelor lor alternative sînt diferite.

Analiza de mai jos nu este valabilă pentru un circuit în care componentele de curent continuu ale celor trei curenți echivalenți secundari ar fi diferite.

β) Forțele magnetomotoare rezultante. Deoarece sensurile de referință ale curenților sînt astfel luate încît curenții pozitivi din bobinajele primare și secundare tind să magnetizeze miezul în sensuri opuse, forțele magnetomotoare care

acționează pe cele trei coloane ale transformatorului (sau pe cele trei miezuri în cazul a trei transformatoare monofazate) sint:

$$\mathcal{F}_1 = w_1 (i_{s1} + I_{s0} - i_{11}); \quad (97.1)$$

$$\mathcal{F}_2 = w_1 (i_{s2} - I_{s0} - i_{12}); \quad (97.2)$$

$$\mathcal{F}_3 = w_1 (i_{s3} + I_{s0} - i_{13}). \quad (97.3)$$

Curenții primari i_{11} , i_{12} și i_{13} nu pot conține componente continue, deoarece nu există în circuitul primar surse de curent continuu, iar existența curenților continui din circuitul secundar nu poate crea curenți continui în primar. Componentele de curent i_{11} , i_{12} , i_{13} , i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} sint toate componente de curent alternativ, iar I_{s0} este singura componentă de curent capabilă să creeze o magnetizare constantă în miez. Forțele magnetomotoare $\mathcal{F}_1$, $\mathcal{F}_2$, $\mathcal{F}_3$ se numesc forțe magnetomotoare reziduale, deoarece ele reprezintă mărimea (de obicei mică și adesea nulă), prin care forțele magnetomotoare datorite curenților primari și secundari diferă de zero. Forțele magnetomotoare reziduale în transformatoare au un efect important asupra funcționării redresorului.

98. Transformatoare monofazate și transformatoare tip manta. Dacă într-un circuit redresor se utilizează transformatoare monofazate sau transformatoare trifazate tip manta și dacă curenții secundari echivalenți au o componentă continuă I_{s0} , magnetizarea continuă care rezultă în miez produce o funcționare nesatisfăcătoare a transformatorului.

Dacă aceste transformatoare se utilizează în mod corect adică în circuite în care curenții secundari echivalenți nu conțin componente continue, forțele magnetomotoare reziduale trebuie să fie nule, deoarece reluctanțele miezurilor și prin urmare curenții de excitație, se presupun neglijabili.

99. Transformatoare trifazate tip simbur, cu bobinajele primare în triunghi. Deoarece transformatoarele tip simbur înăltură majoritatea dificultăților menționate în paragraful precedent și sint ceva mai ieftine, ele sint cel mai des utilizate.

În baza ipotezei de mai sus, a unei reluctanțe neglijabile a miezului, unghiurile care leagă cele trei coloane în paralel, din punct de vedere magnetic, se pot considera că se află în același potențial. Deci diferențele de potențial magnetic dintre capetele celor trei coloane sint egale, însă după cum se va arăta mai jos, ele nu sint în mod necesar nule. Dacă reluctanța fiecărei coloane este neglijabilă, rezultă mai departe că nu este necesară nici o forță magnetomotoare pentru a produce fluxul din coloană și orice forță magnetomotoare imprimată pe coloană apare în întregime ca tensiune magnetică la capetele sale. Rezultă deci, că cele trei forțe magnetomotoare imprimale pe cele trei coloane trebuie să fie egale, deci forțele magnetomotoare reziduale de-a lungul celor trei coloane ale transformatorului, produse de curenții din bobinajele corespunzătoare trebuie să fie egale între ele. Astfel:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_3 \quad (99.1)$$

$$\text{sau:} \quad i_{s1} + I_{s0} - i_{11} = i_{s2} + I_{s0} - i_{12} = i_{s3} + I_{s0} - i_{13}; \quad (99.2)$$

$$\text{deci:} \quad i_{11} - i_{s1} = i_{12} - i_{s2} = i_{13} - i_{s3}. \quad (99.3)$$

Deși forța magnetomotoare totală pe un circuit oricare închis luate în miez este nulă cind reluctanța miezului este neglijabilă, forța magnetomotoare de-a lungul oricărei coloane nu este în mod necesar nulă, deoarece coloana nu este un circuit închis. Deci, forțele magnetomotoare reziduale din ecuația (99.1) nu sint nule, în mod necesar, la transformatoarele tip simbur. Dacă s-ar lua în considerare

numai curentul de excitație necesar ca să producă fluxul în simbur, forța magnetomotoare reziduală ar fi nulă, în cazul unei reluctanțe neglijabile — exact ca în cazul transformatoarelor monofazate sau tip manta discutate mai sus. Dar, chiar în cazul unui circuit liniar, forțele magnetomotoare reziduale în transformatorul tip simbur pot diferi de zero, la anumite conexiuni, din cauza condițiilor care cer ca o componentă alternativă de flux să existe pe calea dintre două juguri, cale care se află în parte în aer și deci nu are o reluctanță nulă. Într-un circuit redresor neliniar pot să existe, pe lângă acest efect, și efectele armonicilor și ale componentelor continue, din curentul secundar, care pot contribui adesea la formarea unei forțe magnetomotoare reziduală, așa cum se va vedea mai jos. Spre deosebire de situația unui transformator monofazat sau tip manta, la transformatorul tip simbur o componentă continuă de forță magnetomotoare reziduală nu produce o saturație de curent continuu defavorabilă în miez. Motivul este că această forță magnetomotoare acționează între cele două juguri și produce în consecință, un flux prin miez, a cărui cale se închide atit prin aer cît și prin carcasa transformatorului. Reluctanța acestei căi este deci mare și fluxul mic. Din cauza simetriei circuitului, acest flux este același în mărime pentru fiecare coloană a transformatorului și din cauza mărimei sale mici produce o saturație de curent continuu neglijabilă.

Din considerațiile de mai sus rezultă că dacă $\mathcal{F}_1$, $\mathcal{F}_2$, $\mathcal{F}_3$ nu sint cunoscute, relația (99.3) nu este suficientă pentru a determina relația între curenții primari și secundari. Această relație și valoarea forțelor magnetomotoare reziduale depind de modul în care sint legate bobinajele primare. În general bobinajele primare sint legate în triunghi. Această conexiune este ilustrată în fig. 195, în care s-a luat pentru exemplificare o conexiune triunghi-stea. Prin urmare, este necesar ca suma celor trei tensiuni de la bornele bobinajelor primare să fie nulă, deoarece suma tensiunilor de linie este nulă.

În cele ce urmează, se va neglija efectul căderilor de tensiune în rezistențele bobinajelor, fără a introduce erori apreciable în rezultate. În consecință, tensiunea la bornele fiecărui bobinaj primar poate fi exprimată ca suma a trei componente:

— Componenta produsă de fluxul care înăltuie numai bobinajul primar și care corespunde unei inductanțe de scăpări L_1 .

— Componenta produsă de fluxul dat de forța magnetomotoare reziduală și care înăltuie toate bobinele de pe aceeași coloană. Acest flux corespunde unei inductanțe L_0 .

— Forțele electromotoare induse: e_{11} , e_{12} și e_{13} , care sint produse de fluxul cuprins în întregime în interiorul miezului.

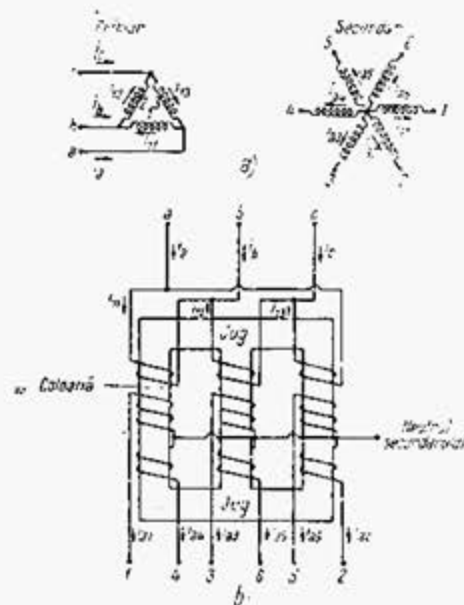


Fig. 195. — Conexiunea triunghi-stea a unui transformator trifazat tip simbur:

a — schema de principiu; b — conexiunile.

Dacă fiecare tensiune de la borne s-ar exprima ca suma acestor componente și dacă această sumă a tensiunilor de la borne se pune egală cu zero — așa cum cere conexiunea în triunghi, se obține:

$$\begin{aligned} & \left[e_{11} + l_1 \frac{di_{11}}{dt} + l_0 \frac{d}{dt} (i_{11} - i_{s1} - i_{s0}) \right] + \\ & + \left[e_{12} + l_1 \frac{di_{12}}{dt} + l_0 \frac{d}{dt} (i_{12} - i_{s2} - i_{s0}) \right] + \\ & + \left[e_{13} + l_1 \frac{di_{13}}{dt} + l_0 \frac{d}{dt} (i_{13} - i_{s3} - i_{s0}) \right] = 0. \end{aligned} \quad (99.4)$$

Dar:

$$e_{11} + e_{12} + e_{13} = 0, \quad (99.5)$$

deoarece suma fluxurilor care produc forțele electromotoare induse este în mod necesar nulă; atunci:

$$(l_1 + l_0) \frac{d}{dt} (i_{11} + i_{12} + i_{13}) - l_0 \frac{d}{dt} (i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}) = 0, \quad (99.6)$$

în care componentele continue ale curenților secundari echivalenți s-au lăsat de o parte, deoarece derivatele lor sînt nule. Împărțind cu $(l_1 + l_0)$ și integrînd ecuația (99.6) se obține:

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} - \frac{l_0}{l_1 + l_0} (i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}) = 0, \quad (99.7)$$

în care constanta de integrare este nulă, deoarece nici unul din curenții din ecuația (99.7) nu conține componente continue. Din relația (99.3) rezultă:

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} - i_{s1} - i_{s2} - i_{s3} = 3i_{11} - 3i_{s1}. \quad (99.8)$$

Combinînd relațiile (99.7) și (99.8), rezultă:

$$i_{11} = i_{s1} - \frac{l_1}{l_1 + l_0} \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}. \quad (99.9)$$

În mod analog:

$$i_{12} = i_{s2} - \frac{l_1}{l_1 + l_0} \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}; \quad (99.10)$$

$$i_{13} = i_{s3} - \frac{l_1}{l_1 + l_0} \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}. \quad (99.11)$$

Forța magnetomotoare reziduală este:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_3 = w_1 (i_{s1} + i_{s0} - i_{11}) = \quad (99.12)$$

$$= \frac{w_1}{3} \frac{l_1}{l_1 + l_0} (i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}) + w_1 i_{s0}. \quad (99.13)$$

Aceste rezultate arată că forța magnetomotoare reziduală conține o componentă continuă $w_1 i_{s0}$ și o componentă alternativă $\frac{w_1}{3} \frac{l_1}{l_1 + l_0} (i_{s1} + i_{s2} + i_{s3})$. Componentele alternative ale curenților secundari echivalenți nu sînt însă de obicei

sinusoidale. Astfel, i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} , pot fi exprimate fiecare într-o serie Fourier, ca suma unei componente de frecvență fundamentală și o serie de componente armonice. Din cauza simetriei celor trei faze, componentele fundamentale ale curenților i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} sînt egale în mărime și defazate între ele cu cite 120° . Astfel, componentele fundamentale, în suma $i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}$, se anulează. În mod analog, toate componentele de frecvențe superioare din această sumă, cu excepția frecvenței armonicii a treia și a multiplilor ei, se anulează. Componenta alternativă a forței magnetomotoare reziduale conține deci numai armonicile 3, 6, 9... Curenții de linie i_a, i_b și i_c sînt dați de relațiile:

$$i_a = i_{11} - i_{13} = i_{s1} - i_{s3}; \quad (99.14)$$

$$i_b = i_{12} - i_{11} = i_{s2} - i_{s1}; \quad (99.15)$$

$$i_c = i_{13} - i_{12} = i_{s3} - i_{s2}. \quad (99.16)$$

Deoarece componentele curenților din bobinajele primare, care produc forța magnetomotoare reziduală, sînt în fază în cele trei bobinaje, ele nu apar în curenții de linie, dar circulă în interiorul triunghiului primar.

100. Transformatoare tip simbur, cu bobinajele primare în stea. Dacă primarul este legat în stea cu punct neutru, cum se arată în fig. 196, condiția:

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} = 0, \quad (100.1)$$

trebuie să fie satisfăcută. Compunînd aceasta relație cu relația (99.8) se obține:

$$i_{11} - i_{s1} = \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}. \quad (100.2)$$

La fel:

$$i_{12} - i_{s2} = \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}. \quad (100.3)$$

și:

$$i_{13} - i_{s3} = \frac{i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}}{3}. \quad (100.4)$$

Forța magnetomotoare reziduală este dată de:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_3 = w_1 (i_{s1} + i_{s0} - i_{11}) = \quad (100.5)$$

$$= \frac{w_1}{3} (i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}) + w_1 i_{s0}. \quad (100.6)$$

Comparînd relația (100.6) cu (99.13) se vede că forța magnetomotoare reziduală pentru conexiunea în stea diferă de aceea pentru conexiunea în triunghi

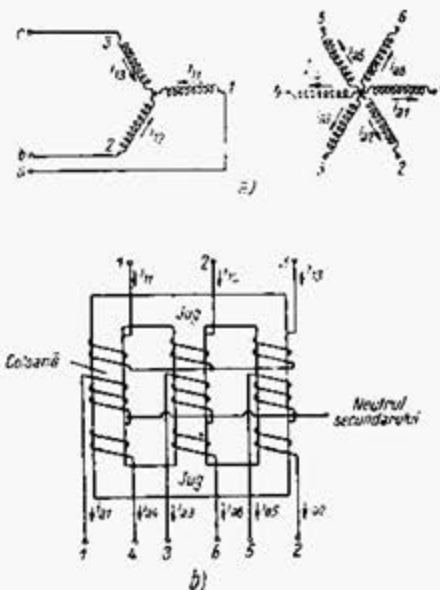


Fig. 196. — Conexiunea stea-stea a unui transformator trifazat tip simbur: a — schema de principiu; b — conexiunile.

numai în ceea ce privește faptul că pentru conexiunea stea componentele alternative ale forței magnetomotoare, care sînt armonicele 3, 6, 9..., ale frecvenței rețelei sînt mai mari, din cauza absenței factorului $\frac{I_1}{I_1 + I_0}$, din expresia (100.6). Analog

componentele curenților primari, care dau naștere forței magnetomotoare reziduale, sînt mai mari și deoarece curenții de linie în conexiunea stea sînt egali cu curenții din bobinaj, aceste componente apar și în curenții de linie.

Analiza de mai sus, a curenților în transformatoarele utilizate la redresoarele polifazate, se poate rezuma astfel:

Transformatoarele monofazate și transformatoarele polifazate în manta trebuie utilizate numai cu acele circuite redresoare în care I_{s0} , adică componenta continuă a curențului secundar echivalent este nulă. Atunci forța magnetomotoare reziduală este nulă și forma de undă a curențului primar este o reproducere a formei de undă a curențului secundar echivalent din fiecare fază.

Transformatorul polifazat tip simbură poate fi utilizat chiar cînd componenta I_{s0} nu este nulă. În acest caz, o componentă continuă a forței magnetomotoare reziduale apare în miez, dar nu produce o saturație dăunătoare a miezului, deoarece ea se aplică de-a lungul unei căi de reluctanță mare. Forța magnetomotoare reziduală poate să conțină de asemenea armonici 3, 6, 9..., ale frecvenței rețelei, care produc un flux pe aceeași cale de reluctanță mare. Formele de undă ale curenților primari pot diferi de acelea ale componentelor alternative ale curenților secundari echivalenți corespunzători, din cauza componentelor necesare pentru a produce componentele alternative ale forței magnetomotoare reziduale.

d) Conexiunile transformatoarelor

101. Generalități. Există cel puțin 40 de circuite redresoare diferite pentru conexiunile tri-, hexa- și dodecafazate la redresoarele alimentate de la o rețea trifazată. Avantajele și dezavantajele acestor circuite se pot deduce analizîndu-le pe fiecare în parte. În acest paragraf se vor discuta numai circuitele cel mai des utilizate; se vor descrie și două circuite simple, care, deși nu sînt des utilizate, sînt caracteristice pentru a ilustra metoda de analiză a circuitelor redresoare polifazate. Pentru fiecare conexiune, se presupune un raport de transformare, care se indică pe diagrama transformatorului. Dacă raportul de transformare într-un circuit dat diferă de valoarea presupusă în calculul de mai jos, este suficient să se înmulțească curenții și tensiunile obținute printr-un factor corespunzător. Potrivit cu practica generală, bobinajele care sînt situate pe aceeași coloană a transformatorului polifazat sau pe miezul unui transformator monofazat, se arată în figuri cu axele paralele, iar bobinajele de pe diferite coloane ale transformatoarelor sau de pe diferite transformatoare, sînt orientate astfel pe figură, ca unghiul dintre axele lor să indice unghiul de fază dintre tensiunile de la borne. Ecuațiile date mai departe țin seamă de efectul inductanței de scăpări a transformatorului, sau de efectul comutației. Pentru ca ecuațiile date să poată fi folosite și pentru cazul cînd aceste efecte se neglijează, factorii de corecție corespunzători sînt scriși în paranteze drepte la sfîrșitul fiecărei relații. Astfel, dacă este necesar să se neglijeze efectul suprapunerii, toți factorii din paranteze pot fi omiși în relațiile care urmează.

102. Conexiunea triunghi-stea. Conexiunea triunghi-stea este rar utilizată, dar se analizează aici pentru stabilirea unor relații fundamentale. În fig. 197a, se arată conexiunea primarului și secundarului transformatorului, iar în fig. 197b, formele de undă ale curenților anodici.

Deoarece există un singur bobinaj pe fiecare fază, iar raportul de transformare pentru simplificare se consideră egal cu unitatea, curenții secundari echiva-

lenți sînt identici cu curenții din bobinajele secundare și cu curenții anodici. Astfel:

$$i_{s1} \div I_{s0} = i_{a1}; \quad (102.1)$$

$$i_{s2} \div I_{s0} = i_{a2}; \quad (102.2)$$

$$i_{s3} \div I_{s0} = i_{a3}. \quad (102.3)$$

Deoarece fiecare anod poartă un curent practic constant pe timpul unei treimi de perioadă, cum arată formele de undă ale curenților anodici din fig. 197b, valoarea medie a fiecărui curent anodic este $1/3$ din valoarea medie a curențului de sarcină:

$$I_{s0} = \frac{I_d}{3}. \quad (102.4)$$

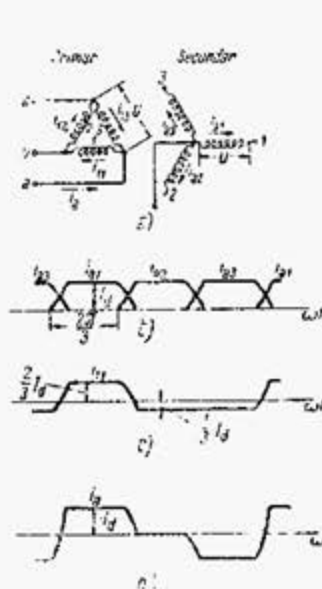


Fig. 197. — Conexiunea triunghi-stea: a — schema de principiu; b — forma de undă a curenților anodici; c — forma de undă a curențului primar; d — forma de undă a curențului de linie.

Pe de altă parte:

$$i_{a1} \div i_{a2} \div i_{a3} = I_d, \quad (102.5)$$

deci:

$$i_{s1} \div i_{s2} \div i_{s3} = 0. \quad (102.6)$$

Deoarece I_{s0} și deci componenta continuă a forței magnetomotoare reziduală nu este nulă, această conexiune nu este potrivită pentru transformatoarele monofazate sau transformatoarele polifazate în manta. Dacă conexiunea se utilizează cu transformatoarele tip simbură, circuitul produce o forță magnetomotoare reziduală care, potrivit cu relația (99.13) este:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_2 = \mathcal{F}_3 = w_1 I_{s0} = w_1 \frac{I_d}{3} \quad (102.7)$$

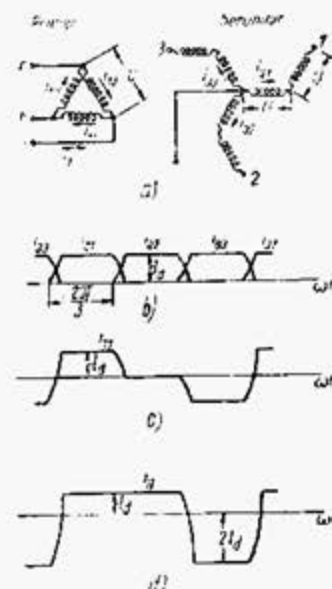


Fig. 198. — Conexiunea triunghi-stea zig-zag: a — schema de principiu; b — forma de undă a curenților anodici; c — forma de undă a curențului primar; d — forma de undă a curențului de linie.

și cuprinde numai o componentă continuă. Curenții primari sunt dați de relațiile (99.9, 99.10, 99.11) și sunt:

$$i_{11} = i_{a1} - I_{s0}; \quad (102.8)$$

$$i_{12} = i_{a2} - I_{s0}; \quad (102.9)$$

$$i_{13} = i_{a3} - I_{s0}. \quad (102.10)$$

Ei sunt deci egali cu curenții anodici, cu excepția că componentele continue lipsesc, așa cum se arată pentru i_{11} în fig. 197c. Prin adunarea grafică a curenților primari, pe baza relațiilor (99.14, 99.15, 99.16) se poate vedea că curenții de linie au forma de undă arătată, pentru i_a în fig. 197d. Deoarece suma curenților primari este nulă, un primar legat în stea la transformatoarele polifazate tip simbură dă același rezultat, cu excepția faptului că curenții de linie sunt identici cu curenții din bobinajele primare. Acești curenți au deci forma din fig. 197c. Principalele obiecțiuni ale acestui circuit sunt: tensiunea de undulație ridicată la ieșire, o componentă continuă mare a forței magnetomotoare reziduale și un conținut mare în armonici în curentul de linie primar, care conține și armonici pare.

103. Conexiunea triunghi-stea zig-zag. Deși conexiunea triunghi-stea zig-zag, indicată în fig. 198a, necesită un număr mai mare de spire secundare, ea se folosește pentru că are mai multe avantaje față de conexiunea triunghi-stea.

Cu raportul de transformare indicat în fig. 198a, curentul în fiecare bobinaj secundar — raportat la primar — este egal cu curentul anodic. Din cauza conexiunilor arătate în fig. 198a:

$$i_{s1} + I_{s0} = i_{a1} - i_{a3}; \quad (103.1)$$

$$i_{s2} + I_{s0} = i_{a2} - i_{a1}; \quad (103.2)$$

$$i_{s3} + I_{s0} = i_{a3} - i_{a2}. \quad (103.3)$$

Deoarece fiecare curent anodic conține aceleași componente continue, fiecare din diferențele ca $(i_{a1} - i_{a3})$ nu conțin componente continue, astfel încât:

$$I_{s0} = 0. \quad (103.4)$$

Adunând expresiile (103.1), (103.2) și (103.3) se obține în baza condiției (103.4):

$$i_{s1} + i_{s2} + i_{s3} = 0. \quad (103.5)$$

Forța magnetomotoare reziduală este deci nulă fiind bobinajele secundare sunt legate în zig-zag, indiferent de tipul transformatorului utilizat și de conexiunea în triunghi sau în stea a primarului. Curenții primari sunt dați de relațiile:

$$i_{11} = i_{s1} - i_{a1} - i_{a3}; \quad (103.6)$$

$$i_{12} = i_{s2} - i_{a2} - i_{a1}; \quad (103.7)$$

$$i_{13} = i_{s3} - i_{a3} - i_{a2}. \quad (103.8)$$

Iar curenții de linie pentru conexiunea în triunghi rezultă din:

$$i_a = i_{11} - i_{13} = i_{a1} + i_{a2} - 2i_{a3}; \quad (103.9)$$

$$i_b = i_{12} - i_{11} = i_{a2} + i_{a3} - 2i_{a1}; \quad (103.10)$$

$$i_c = i_{13} - i_{12} = i_{a3} + i_{a1} - 2i_{a2}. \quad (103.11)$$

În fig. 198b, se arată curenții anodici, în fig. 198c, curentul primar i_{11} și în fig. 198d, curentul de linie i_a . Deoarece forța magnetomotoare reziduală este nulă, această conexiune dă o funcționare satisfăcătoare, fie că se utilizează transformatoare monofazate, transformatoare polifazate în manta sau transformatoare polifazate tip simbură. În afară de aceasta, deoarece suma curenților de fază primari

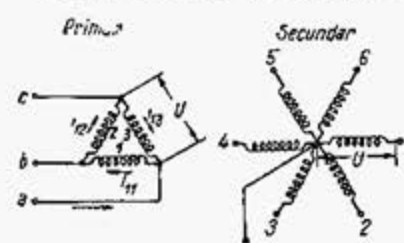


Fig. 199. — Conexiunea triunghi-stea hexafază.

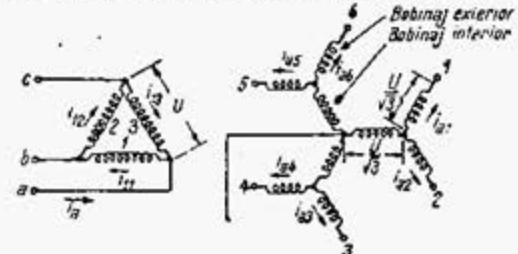


Fig. 200. — Conexiunea triunghi-stea în fureă.

este nulă, se obține același rezultat cu primarul legat în stea sau în triunghi, chiar dacă se folosesc transformatoare polifazate tip simbură, cu singura excepție că atunci curentul de linie are forma din fig. 198c, în loc de 198d. Acest circuit dă o tensiune de undulație mare la bornele de ieșire ale redresorului și introduce armonice importante, inclusiv cele pare, în curentul de linie.

104. Conexiunea triunghi-stea hexafază. Conexiunea triunghi-stea hexafază arătată în fig. 199 este rar utilizată din cauza caracteristicilor sale defectuoase.

105. Conexiunea triunghi-stea în fureă. Conexiunea triunghi-stea în fureă arătată în fig. 200, se folosește în redresoarele de putere medie.

După cum se arată în figură, toate bobinajele secundare au aceeași tensiune nominală care pentru analiza de mai jos se presupune egală cu tensiunea bobinajului primar împărțită prin $\sqrt{3}$. În felul acesta tensiunea totală în secundar între o bornă și punctul neutru este egală cu tensiunea primară.

Fiecare anod conduce a șasea parte dintr-o perioadă, așa cum se arată în fig. 201a. Bobinajele exterioare sau bobinajele ramură poartă fiecare câte un curent anodic, însă bobinajele interioare sau bobinajele stea poartă fiecare curentul a doi anodi consecutivi. Examinând fig. 200 rezultă:

$$\sqrt{3}(i_{s1} + I_{s0}) = i_{a1} + i_{a2} - i_{a4} - i_{a5}; \quad (105.1)$$

$$\sqrt{3}(i_{s2} + I_{s0}) = i_{a3} + i_{a4} - i_{a1} - i_{a6}; \quad (105.2)$$

$$\sqrt{3}(i_{s3} + I_{s0}) = i_{a5} + i_{a6} - i_{a2} - i_{a3}. \quad (105.3)$$

Componenta de curent continuu a curenților secundari echivalenți, I_{s0} este nulă pentru că forțele magnetomotoare au sensuri opuse în bobinajele secundare.

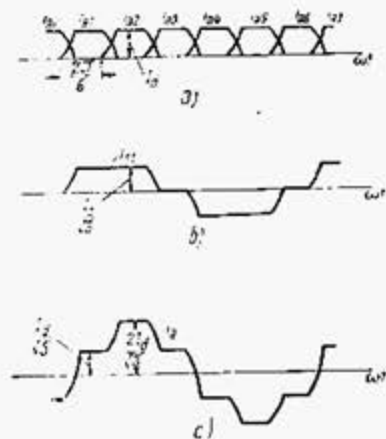


Fig. 201. — Formele de undă pentru schema din fig. 200: a — curenții anodici; b — curentul primar; c — curentul de linie.

Toate sumele din membrul 2 al ecuațiilor (105.1), (105.2) și (105.3) sînt nule, deci suma $i_{s1} + i_{s2} + i_{s3}$ este nulă. În consecință, forța magnetomotoare reziduală fiind nulă pentru orice tip de transformator, se poate scrie:

$$i_{11} = i_{s1}; \quad (105.4)$$

$$i_{12} = i_{s2}; \quad (105.5)$$

$$i_{13} = i_{s3}. \quad (105.6)$$

Fig. 201b, arată curentul primar:

$$i_{11} = i_{s1} = \frac{i_{a1} + i_{a2} - i_{a5} - i_{a6}}{\sqrt{3}}, \quad (105.7)$$

iar fig. 201c, arată curentul de linie:

$$i_a = i_{s1} - i_{s3} = \frac{i_{a1} + 2i_{a2} + i_{a3} - i_{a5} - 2i_{a6} - i_{a6}}{\sqrt{3}}. \quad (105.8)$$

Curentul de linie nu conține armonice pare și se aseamănă cu o sinusoidă mult mai bine decît curentul de linie din cazul conexiunii triunghi-stea. Deoarece curentul I_{s0} este nul se pot utiliza transformatoare monofazate sau transformatoare polifazate tip manta cu acest circuit, cu aceleași rezultate ca și transformatoarele tip simbur. Deoarece suma curenților de fază primari este nulă, bobinajele primare pot fi legate în stea cînd se utilizează transformatoare polifazate tip simbur. Dînd aceleași rezultate, cu singura excepție că curentul de linie este cel dat în fig. 201b, în locul celui din fig. 201c.

Din relațiile (94.4) se obține valoarea eficace a curentului anodic

$$I_a = \frac{I_d}{\sqrt{6}} [\sqrt{1 - 6\psi(\gamma)}]. \quad (105.9)$$

Bobinajele exterioare poartă fiecare acest curent. Bobinajele stea însă poartă curentul a doi anodi consecutivi, deoarece m din relația (94.4) trebuie luat egal cu 3. Valoarea eficace a acestui curent este:

$$I_{st} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} [\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}]. \quad (105.10)$$

Valoarea lui γ este aceeași atît pentru curentul I_a cît și pentru I_{st} . Curentul primar are o durată de $\frac{2\pi}{3}$ radiani și are altă alternanță pozitivă cît și alternanțe negative.

Valoarea sa maximă este $I_d/\sqrt{3}$ pentru raportul de transformare utilizat aici.

Prin urmare în relația (94.4) m este egal cu 3, I_d trebuie înlocuit cu

$\frac{I_1}{\sqrt{3}}$, iar întreaga expresie se multiplică cu $\sqrt{2}$.

$$I_1 = \frac{\sqrt{2} I_d}{3} [\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}]. \quad (105.11)$$

Curentul de linie I_1 are o valoare eficace egală cu $\sqrt{3} I_1$, deoarece forța magnetomotoare reziduală este nulă și prin urmare nu există un curent de circulație în interiorul triunghiului primar. Unghiul de suprapunere din relațiile (105.9), (105.10) și (105.11) este mic pentru conexiunea în triunghi-stea în furcă, deoarece se comută la un moment dat numai un bobinaj secundar. Cînd curentul trece de la anodul 1 la anodul 2 în fig. 200, curentul din bobinajul stea corespunzător nu se modifică. Reactanța efectivă sau reactanța de comutație este prin urmare aici aceeași ca la conexiunea stea hexafazată al cărei bobinaj secundar ar avea o tensiune $\frac{U}{\sqrt{3}}$. Cînd curentul se deplasează de la anodul 2 la anodul 3, tensiunea pe reactanța datorită bobinajelor exterioare 2 și 3 se anulează reciproc, deoarece ele se află pe aceeași coloană a transformatorului. Reactanța de comutație este din nou echivalentă cu aceea a unui transformator al cărui secundar ar avea o tensiune $U/\sqrt{3}$. Deoarece reactanța variază cu patratul tensiunii, reactanța de comutație care trebuie utilizată în expresia (94.5) pentru determinarea lui U este $\frac{X_2}{3}$, în care X_2 este reac-

tanța echivalentă de scăpări măsurată între neutrul secundarului și o bornă a transformatorului, cînd toate celelalte bobinaje secundare sînt în gol, iar toate bobinajele primare sînt în scurtcircuit. Tensiunea redresată din relația (94.1) rezultă:

$$U_d' = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U \left[\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right]^*, \quad (105.12)$$

sau:

$$U_d' = 1,35 U - \left[\frac{I_d X_2}{\pi} \right]. \quad (105.13)$$

În funcție de curentul primar, din (105.11) se poate scrie:

$$I_d = \frac{3 I_1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}} \right], \quad (105.14)$$

iar X_1 , reactanța echivalentă raportată la primar, este egală cu X_2 .

Înlocuind aceste valori în relația (105.13) se obține pentru tensiunea redresată:

$$U_d' = 1,35 \left\{ U - \left[\frac{I_1 X_1}{2\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}} \right] \right\}. \quad (105.15)$$

Puterea aparentă a transformatorului este suma puterilor din bobinajele exterioare și interioare ale secundarului.

$$P_2 = 6 \frac{U}{\sqrt{3}} I_a + 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_{st}. \quad (105.16)$$

* În § 105 și 107, se presupune un transformator cu raport de transformare egal cu unitatea. În formule, prin U se înțelege tensiunea secundară ($U = U_2$). Pentru un transformator cu raport de transformare $n = \frac{w_2}{w_1}$, tensiunea primară este $U_1 = \frac{U_2}{n}$, iar curenții I_1 și I_2 devin nI_1 și nI_2 . Expresiile puterilor rămîn nemodificate.

Dacă mărimile U , I_a și I_{st} exprimate în funcție de U_d și I_d date de expresiile (105.12), (105.9) și (105.10), respectiv se înlocuiesc în relația (105.16) se obține o nouă expresie a puterii aparente în secundarul transformatorului:

$$P_2 = \pi \frac{\sqrt{2} + 1}{3\sqrt{2}} U_d I_d \left[\frac{\sqrt{2} \sqrt{1 - 6\psi(\gamma)} + \sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}}{(\sqrt{2} - 1) \cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \right] \quad (105.17)$$

În mod analog, se găsește puterea aparentă a primarului transformatorului:

$$P_1 = 3U I_1 = \quad (105.18)$$

$$= \frac{\pi}{3} U_d I_d \left[\frac{\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}}{\cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \right] \quad (105.19)$$

și în fine puterea aparentă absorbită de la rețea este:

$$P_l = \sqrt{3} U I_l = 3U I_l = P_1 = \quad (105.20)$$

$$= \frac{\pi}{3} U_d I_d \left[\frac{\sqrt{1 - 3\psi(\gamma)}}{\cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \right] \quad (105.21)$$

Puterea nominală a secundarului transformatorului, pentru această conexiune stea în furcă, este doar cu puțin mai mare decât în cazul conexiunii stea hexafază. Puterea nominală a primarului este cu aproximativ 23 % mai mare decât în cazul conexiunii stea, dar reglajul de tensiune al redresorului este numai 41 % față de cazul precedent. Factorii de putere pentru puterea absorbită de la rețea sînt aproximativ egali.

Principalul dezavantaj al acestei conexiuni este secundarul relativ complicat și costisitor.

106. Conexiuni cu egalizare de fază. Principiul egalizării de fază. În paragrafele precedente s-au examinat numai conexiunile în care, în afară de un interval mic de suprapunere sau comutație, un singur anod poartă la un moment dat întregul curent de sarcină al redresorului.

Din cauza factorului de utilizare mic al transformatorului care rezultă în aceste conexiuni simple, transformatorul anodic este de volum mare și neeconomic. Aceasta constituie un dezavantaj important deși tensiunea de undulație este multumitoare. Din acest motiv s-au imaginat conexiuni care funcționează astfel încît doi, trei sau mai mulți anodi să conducă curentul simultan și într-un interval de timp mult mai mare decât acela care există în conexiunile polifazate simple. O astfel de funcționare se obține printr-o egalizare de fază, adică un proces în care mai multe faze succesive, sau mai multe grupuri de faze independente sînt cuplate pe cale electromagnetică astfel încît să producă niște tensiuni anodice care au o formă de undă mai mult sau mai puțin trapezoidală, rezultînd din tensiunile sinusoidale componente ale fazelor care funcționează simultan.

Conexiunile care folosesc principiul egalizării de fază se caracterizează deci prin faptul că mai mulți anodi conduc curentul simultan și că tensiunea redresată obținută este egală în orice moment cu tensiunea medie a fazelor care lucrează simultan. Cu ajutorul egalizării de fază, avantajul unei tensiuni redresate destul de netede care rezultă din multiplicarea fazelor se obține fără dezavantajul concomitent al unui factor de utilizare mic al transformatorului. Modul cel mai convenabil

de aplicare a principiului egalizării de fază constă în subdivizarea sistemului polifazat în două sau mai multe sisteme independente de grupe de faze simetrice și similare avînd fiecare un număr de faze m care este un submultiplu al numărului total de faze al redresorului. Aceste grupe se dispun astfel încît să fie decalate cu același unghi de fază între ele. Punctele neutre ale grupurilor de faze se leagă împreună cu polul negativ al sistemului de curent continuu printr-una sau mai multe bobine speciale, denumite *transformatoare interfază* sau *egalizoare de fază* care sînt magnetizate de curenții armonici care curg în diferitele bobinaje secundare ale transformatorului anodic și care produc astfel tensiunile armonice corespunzătoare, necesare pentru a egaliza diferențele de tensiune instantanee dintre fazele care funcționează simultan. Egalizoarele de fază asigură de asemenea împărțirea curentului redresat în mod egal între diferitele grupe de faze. Curentul de sarcină în orice moment este purtat în mod egal de diferitele faze, cîte una din fiecare grup, lucrînd împreună și prin rotație.

Conexiunea dublu-trifază. În categoria conexiunilor care au un caracter hexafazat, cea mai des utilizată este conexiunea dublu-trifază cu un egalizor de fază sau transformator interfază cu două miezuri.

În această conexiune, sistemul hexafazat este subdivizat în două sisteme trifazate independente, avînd între ele un decalaj de fază de 180° electrice, care se pun să funcționeze în paralel cu ajutorul unui egalizor de fază legat între punctele lor neutre. Tensiunea redresată care se obține în acest caz este arătată în fig. 202b, construită în ipoteza neglijării fenomenului de comutație. Se vede că undulația de o frecvență de trei ori frecvența de alimentare din cele două sisteme se combină astfel încît produce la bornele redresorului o undulație mult mai mică, de o frecvență de șase ori frecvența de alimentare, ca în cazul redresării simple hexafazate arătate în fig. 202a.

Curentul de sarcină se împarte în mod egal între cele două sisteme trifazate, care funcționează în paralel cu o tensiune la borne, care este media potențialelor celor două grupuri de faze. Fiecare grup de faze funcționează ca un sistem redresor simplu, iar circuitul redresor în ansamblu posedă un caracter hexafazat. Se vede din figură că tensiunea medie redresată U_{da} corespunde funcționării trifazate, deci pentru aceeași tensiune eficace de fază U_2 ea este cu 13 % mai mică decât în cazul redresării simple hexafazate.

Funcționarea egalizorului. Cele două bobinaje ale egalizorului de fază sînt astfel situate pe miez încît curenții continui care le traversează, magnetizează miezul în sensuri opuse. Deoarece acești curenți sînt egali, forțele magnetomotoare se compensează și nu produc nici o magnetizare a miezului. Miezul rămîne să fie magnetizat numai de armonica a treia a curentului care circulă între punctele neutre ale celor

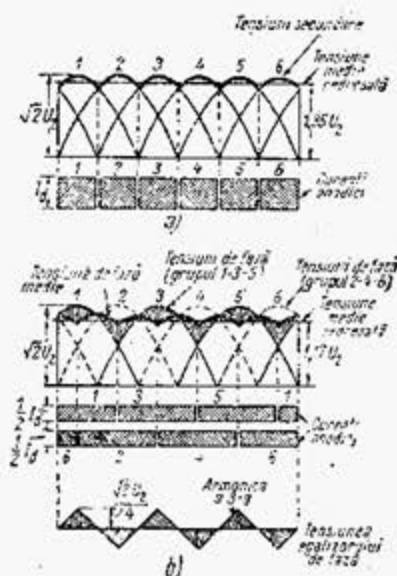


Fig. 202. - Forme de unde ale tensiunilor și curenților în circuite cu egalizare de fază:

a - redresare hexafază; b - redresare dublu-trifază.

două sisteme trifazate și produce un flux de armonica a treia care, la rândul lui, creează tensiunea necesară pentru egalizarea fazelor. Acest curent de circulație rezultă din componenta armonică a treia care există în curentul anodic în orice funcționare de redresor hexafazat, dar care nu există în cazul funcționării cu redresor trifazat. Fluxul de armonica a treia este astfel produs de diferența între cele două grupuri de curenți anodici ai celor două faze care funcționează simultan și care curg în orice moment prin bobinajele egalizorului de fază.

În consecință, egalizoarele de fază funcționează prin absorbirea armoniei a treia conținute în perechile succesive de curenți anodici care curg simultan și prin utilizarea acestor curenți pentru a crea o tensiune de frecvență triplă care egalizează diferența de potențial instantanee dintre cele două sisteme trifazate: de aici derivă și numele de « bobină de absorbție ».

Sarcina critică. Dacă se examinează funcționarea egalizorului de fază, se constată că atunci când sarcina redresorului scade sub o anumită valoare minimă, denumită sarcina critică sau de tranziție (care are de obicei o valoare mai mică decât 1 % din sarcina plină) atunci diferența instantanee dintre mărimile curenților continui care curg între cele două bobinaje ale egalizorului de fază este insuficientă pentru a produce fluxul necesar de frecvență triplă; ca rezultat egalizorul de fază încetează de a mai funcționa în modul arătat mai sus.

În această situație el lucrează ca un scurtcircuit între punctele neutre ale celor două sisteme trifazate.

Circuitul redresor se comportă atunci ca un simplu sistem hexafazat și tensiunea medie redresată U_{d0} crește de la valoarea $1,17U_2$ la valoarea $1,35U_2$, adică cu 15 %. Această creștere bruscă a tensiunii în regim de sarcină redusă este o caracteristică fundamentală a tuturor conexiunilor cu egalizare de fază. Pentru evitarea ei trebuie, fie să se prevadă o sarcină suplimentară permanentă la bornele redresorului, fie să se introducă mijloace speciale pentru furnizarea curentului de magnetizare de frecvență armonică a treia în egalizorul de fază, de la o sursă oarecare externă de cîte ori sarcina redresorului scade sub valoarea critică.

Puterea egalizorului de fază. Din punct de vedere practic, egalizorul de fază nu este altceva decît un simplu transformator monofazat cu raportul 1/1, ceea ce justifică denumirea de transformator interfază. Tensiunea pe fiecare din cele două bobinaje este diferența dintre potențialele medii ale ambelor grupuri de faze și tensiunea de fază a unuia din sistemele trifazate. Ea are o formă de undă aproape triunghiulară, așa cum se arată în fig. 202b. Amplitudinea ei este egală cu $\frac{1}{4} \sqrt{2}U_2$ și valoarea ei eficace este aproximativ $\frac{1}{4} U_{d0}$.

Privind egalizorul de fază ca un transformator obișnuit cu două bobinaje funcționînd la frecvența de alimentare și ținînd seama că tensiunea pe bobinaje este invers proporțională cu frecvența, se poate spune că puterea aparentă echivalentă este:

$$2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{d0}}{4} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{1}{12} P_d \quad (106.1)$$

adică 8,5 % din puterea redresată.

Avantajele conexiunii dublu-trifazate. Conexiunea dublu-trifazată are marele merit al simplității și după cum se va vedea la § 107, ea are avantajul celui mai bun factor de utilizare al transformatorului anodic care se poate obține într-o redresare hexafazată. Din acest motiv ea este conexiunea aproape cel mai mult utilizată în practică.

Conexiunea triplu-monofazată. O altă conexiune care utilizează egalizorul de fază și care reduce factorul de vîrf al curenților anodici, dînd un curent de sarcină al anozilor mai mic — o caracteristică de importanță practică foarte mare — este conexiunea triplu-monofazată cu trei egalizoare de fază. În această conexiune, sistemul redresor hexafazat este subdivizat în trei grupe de faze independente, avînd un caracter monofazat dublu-alternanță și decalate între ele cu un unghi de fază de 120° electrice.

Aceste sisteme monofazate se pun să funcționeze în paralel prin trei bobinaje ale unui egalizor de fază, legate între punctele neutre și polul negativ al sistemului de curent continuu. Tensiunea redresată care rezultă în acest caz este arătată în fig. 203 din care se vede că pulsațiile de frecvență dublă din forma de undă a tensiunii redresate a celor trei sisteme se combină și dau o tensiune de undulație foarte redusă, avînd caracterul unui sistem hexafazat, la fel cu cel din fig. 202a. Curentul continuu se împarte în mod egal între sistemele monofazate funcționînd în paralel pe aceeași tensiune, care este media potențialelor celor trei grupe de faze. Fiecare grup de faze funcționează ca un redresor monofazat dublu-alternanță, pe cînd pe de altă parte circuitul redresor în ansamblu posedă caracterul hexafazat. După cum se vede în partea de sus a fig. 203 valoarea medie a tensiunii U_{d0} corespunde cazului $n = 2$ și pentru aceeași valoare eficace a tensiunii de fază U_2 este deci cu 33 % mai mică decît în cazul funcționării simple hexafazate. În acest sistem egalizorul este construit ca o bobină de reacțanță trifazată; fiecare din cele trei bobine poartă o treime din curentul total al redresorului, tensiunea pe fiecare bobină fiind diferența dintre potențialul mediu al celor trei grupe de faze și tensiunea de fază a unui grup are o frecvență fundamentală care este dublul frecvenței de alimentare.

Puterea egalizorului de fază. După cum se vede în partea de jos a fig. 203 tensiunea egalizorului este nesimetrică și astfel conține armonice pare de o frecvență și mai mare. Valoarea sa eficace este aproximativ $1/2 U_{d0}$, astfel încît privind egalizorul de fază ca un autotransformator obișnuit cu trei bobinaje funcționînd la frecvența de alimentare, puterea aparentă a egalizorului este:

$$3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{d0}}{2} \cdot \frac{I_d}{3} = \frac{1}{4} P_d \quad (106.2)$$

adică 25 % din puterea redresată.

Dezavantajele conexiunii triplu-monofazate. La conexiunea triplu-monofazată egalizorul de fază rezultă de trei ori mai mare decît în cazul circuitului dublu-

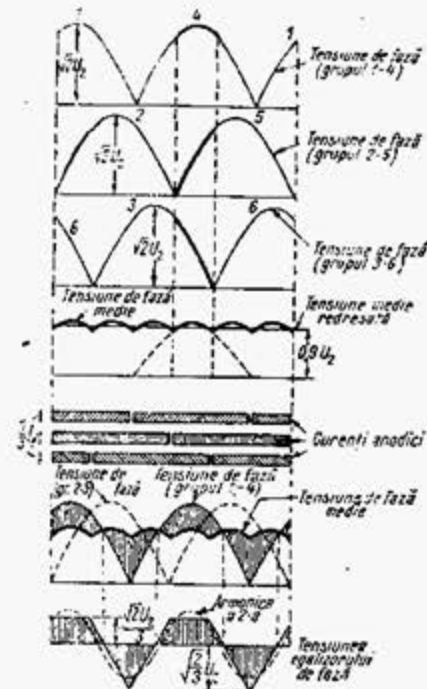


Fig. 203. — Forme de unde ale tensiunilor și curenților într-un circuit redresor triplu-monofazat, cu egalizare de fază.

trifazat. În afară de aceasta, el are trei miezuri și trei bobinaje în loc de două și deci este mai costisitor. Acest fapt împreună cu un factor de utilizare al transformatorului ceva mai mic în comparație cu circuitul dublu-trifazat face ca circuitul redresor triplu-monofazat să aibă o utilizare mai redusă în practică.

Alte conexiuni cu egalizare de fază. Alte exemple de conexiuni cu egalizare

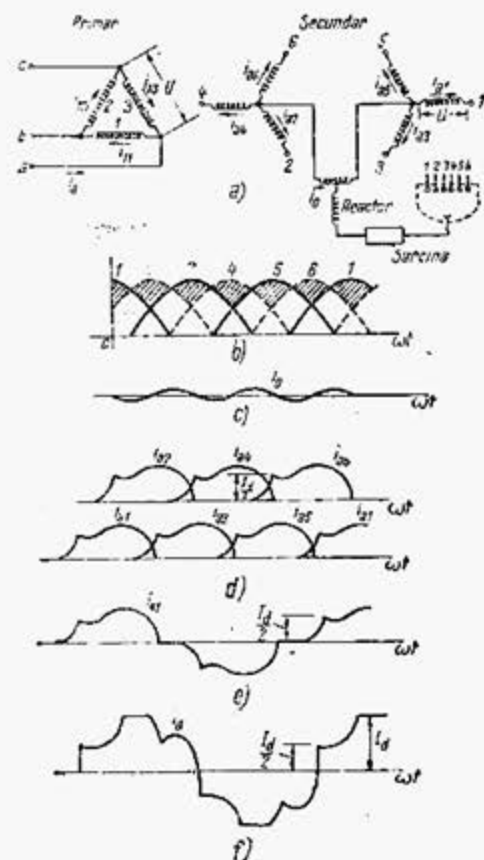


Fig. 204. - Conexiunea triunghi-dublă stea (conexiunea dublu-trifazată):

a - schema de principiu; b - forma de undă a tensiunii redresate; c - forma de undă a curentului prin transformatorul interfază; d - forma de undă a curentilor anodici; e - forma de undă a curentului primar; f - forma de undă a curentului de linie.

Iară însă spițele unei roți sînt deplasate față de spițele celeilalte roți cu un unghi de 60° . Lungimea acestor spițe corespunde cu valoarea maximă a tensiunii secundare sinusoidale a transformatorului. Dacă suprafața plană reprezintă potențialul catodului, iar căderea de tensiune pe arc se neglijează, atunci distanța pe verticală dela centrul roților la suprafață reprezintă valorile instantanee ale tensiunilor

măsurate de la centrul stelelor la catodul redresorului. În adevăr, dacă se neglijează căderea de tensiune pe arc, potențialul unui anod care corespunde nivelului capătului unei spițe nu poate să devină mai mare decît potențialul catodului. În timp ce roțile se învîrtesc, centrul lor trasează o curbă care raportată la suprafața plană reprezintă tensiunile redresate care ar fi date de cele două stele dacă ele ar fi legate la două mulatoare cu sarcini separate. Conexiunea dublu-stea folosește însă un singur mulator, iar în modelul mecanic transformatorul interfază este reprezentat de o bară rigidă, care leagă centrele celor două roți. Prin această reprezentare se presupune că transformatorul interfază este un reactor perfect, astfel încît, indiferent de curentul care curge prin bobinajul său, gradientul de potențial este uniform de-a lungul bobinajului. În modelul mecanic această presupunere înseamnă o bară rigidă. Tensiunea redresată care apare între priza mediană a transformatorului interfază și catod, la circuitul electric, este atunci reprezentată în modelul mecanic prin distanța pe verticală considerată de la centrul barei la suprafața plană, iar punctul central al barei trasează o traiectorie, care, raportată la suprafața plană, reprezintă forma de undă a tensiunii redresate.

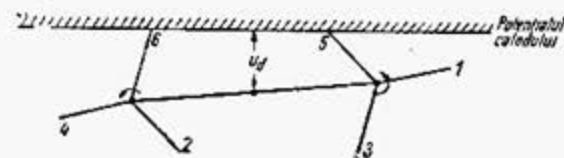


Fig. 205. - Modelul mecanic al circuitului redresor dublu-trifazat.

Examinînd figura se vede că frecvența variației tensiunii redresate este de două ori mai mare decît frecvența variației tensiunii sinusoidale, raportate la cele două puncte neutre, adică la centrele roților în modelul mecanic.

Tensiunea redresată. Figura 204b reprezintă tensiunile redresate ale celor două stele care ar rezulta dacă stelele ar fi legate la redresoare separate și sarcini distincte. Aici se neglijează efectul comutației. Linia plină 1-3-5 arată tensiunea redresată pe una din stele și linia punctată 2-4-6 tensiunea redresată pe cealaltă stea.

În cazul circuitului din fig. 204a, transformatorul interfază absoarbe diferența dintre cele două tensiuni, astfel încît tensiunea redresată instantanee care se măsoară de la priza mediană a transformatorului interfază este egală cu valoarea instantanee a mediei tensiunilor redresate ale celor două stele.

Din tabelele 10 și 11 rezultă că tensiunea redresată 1-3-5 este:

$$u_{d10} = 1,17 U [1 + 0,25 \cos 3\omega t - 0,057 \cos 6\omega t + 0,025 \cos 9\omega t - \dots], \quad (107.1)$$

deoarece tensiunea redresată produsă de celelalte stele este decalată în timp cu 60° .

$$u_{d20} = 1,17 U [1 + 0,25 \cos 3(\omega t + 60^\circ) - 0,057 \cos 6(\omega t + 60^\circ) + 0,025 \cos 9(\omega t + 60^\circ) - \dots] = \quad (107.2)$$

$$= 1,17 U [1 - 0,25 \cos 3\omega t - 0,057 \cos 6\omega t - 0,025 \cos 9\omega t - \dots]. \quad (107.3)$$

Tensiunea redresată instantanee a întregului sistem, care este media instantanee a tensiunilor u_{d10} și u_{d20} este:

$$u_{d0} = 1,17 U [1 - 0,057 \cos 6\omega t - \dots]. \quad (107.4)$$

Avantajele conexiunii triunghi-dublă stea. Valoarea medie a tensiunii redresate se vede că este aceeași ca și pentru redresorul trifazat, adică $U_{d0} = 1,17 U$, pe cînd fără transformator interfază, adică pentru o conexiune stea hexafazăată am avea $U_{d0} = 1,35 U$; tensiunea de ondulație este însă aceeași ca pentru

un redresor hexafazat. Deoarece fiecare anod conduce o treime dintr-o perioadă, factorul de utilizare al secundarului transformatorului este același ca pentru un redresor trifazat care s-a văzut că dă cel mai mare factor de utilizare posibil. De asemenea redresorul lucrează în condiții mai bune de cît s-ar fi obținut fără transformatorul interfază, deoarece curentul anodic este numai jumătate din curentul de sarcină pe cînd fără transformatorul interfază el este egal cu curentul de sarcină.

Această valoare redusă a curentului prin redresor dă în general o cădere de tensiune pe arc mai mică și prin urmare o pierdere mai mică în redresor.

Funcționarea transformatorului interfază (egalizor). Pentru a studia forma de undă a diversilor curenți, este necesar să se înțeleagă mai înțeli efectul lor în transformatorul interfază. Să presupunem că redresorul este în sarcină și că la un moment dat conduce anozii 1 și 2. Transformatorul interfază se poate considera ca un transformator cu două bobinaje pe care se aplică

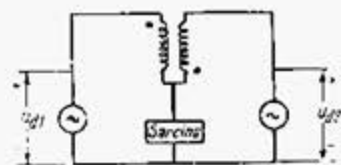


Fig. 206. — Schema de principiu a redresorului dublu-trifazat, pentru explicarea funcționării transformatorului interfază.

cele două tensiuni redresate u_{d10} și u_{d20} , arătate de relațiile (107.1) și (107.3), în serie cu sarcina, așa cum se vede în fig. 206.

Componentele armonice ale tensiunilor u_{d10} și u_{d20} care sînt multipli de 3 ai frecvenței de alimentare sînt în opoziție de fază după cum se vede din relațiile (107.1) și (107.3), astfel încît transformatorul interfază lucrează ca un transformator în gol față de aceste tensiuni și în consecință le absoarbe. Componentele armonice ale tensiunilor u_{d10} și u_{d20} , care sînt multipli de 6 ai frecvenței de alimentare, sînt în fază, de aceea transformatorul interfază se comportă ca un transformator în scurtcircuit și permite ca această tensiune să creeze un curent prin sarcină.

Tensiunea redresată reală este dată deci de relația (107.4). Pentru ca transformatorul interfază să poată absorbi armonica a treia, a noua și celelalte armonice care nu sînt multipli de 6 ai frecvenței de alimentare, ele trebuie să aibă un curent de excitație egal cu tensiunea armonică de la bornele sale împărțită prin reactanța de magnetizare armonică a transformatorului interfază. Acest curent de excitație nu trece prin sarcină, ci urmează un drum ocolit prin transformatorul interfază și bobinajele secundare ale transformatorului anodic, corespunzătoare anozilor care conduc. Prin urmare acest curent curge de la anod la anod, în interiorul redresorului. Se înțelege că nu trebuie să se creadă că se formează un arc între cei doi anodi din cauza acestui curent. Deoarece tensiunea de armonică a treia este mare în comparație cu tensiunea de armonică a noua sau de ordin superior, acești curenți armonici pot fi neglijati, astfel încît curentul total se poate presupune format numai din armonică a treia.

În fig. 204b, porțiunile hașurate reprezintă tensiunea la bornele transformatorului interfază. Dacă se neglijează rezistența, curentul de armonică a treia este în cvadratură față de tensiunea de armonică a treia, așa cum se vede în fig. 204c, și este suprapus peste curenții anodici, cum se arată în fig. 204d. În această figură s-a ținut seama și de efectul de comutație. Curentul de armonică a treia este mult mai mic decît apare din aceste diagrame fiindcă reactanța transformatorului interfază este mare.

Sarcina critică. Deoarece componenta armonică a treia de curent trebuie privită ca urmînd o cale de la anod la anod în interiorul redresorului, rezultă că ea poate să existe numai cînd curentul de sarcină care trece printr-un anod este

destul de mare pentru ca curentul resultant în anod să fie pozitiv în toată perioada de conducție. Această condiție nu se realizează la sarcini foarte mici sau la funcționarea în gol a redresorului. Din acest motiv acțiunea transformatorului interfază lucrează la astfel de sarcini, iar funcționarea generală a circuitului redresor devine asemănătoare cu a unui circuit avînd conexiunea stea hexafazată. Rezultatul principal este că tensiunea redresată scade de la valoarea $1,35U$, de la mersul în gol, la valoarea $1,17U$ la un curent de 1% din mersul în plină sarcină. Această regiune de reglaj prost al tensiunii poate fi evitată dacă se menține o sarcină auxiliară pe redresor suficient de mare pentru a permite funcționarea normală a transformatorului interfază, chiar cînd sarcina principală este nulă.

Calculul curentului de sarcină critic, se poate face dacă observăm că el reprezintă limita de trecere de la funcționarea cu 120° conducție anodică, la funcționarea cu 60° conducție anodică.

În primul caz, egalizorul de fază își îndeplinește rolul și comutația curentului se face între doi anodi ai aceluiași grup de faze. Tensiunea medie redresată se găsește punînd $m = 3$ și $I_d = \frac{I_k}{2}$ în relația (94.3):

$$U'_{d0} = \sqrt{2} U \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} - \frac{3}{\pi} \frac{X_2 I_k}{2 \cdot 2} = 1,17 U - \frac{3}{2\pi} X_2 \frac{I_k}{2} \quad (107.5)$$

În cazul al doilea, egalizorul nu își mai îndeplinește rolul și comutația curentului se face între doi anodi consecutivi, adică aparținînd la grupuri de faze diferite. Tensiunea medie redresată se găsește punînd $m = 6$ și $I_d = I_k$, în relația (94.3):

$$U'_{d0} = \sqrt{2} U \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} - \frac{6}{\pi} \left(X_2 + \frac{X_0}{2} \right) \frac{I_k}{2} = 1,35 U - \frac{6}{4\pi} (2 X_2 + X_0) I_k \quad (107.6)$$

În aceste expresii, X_2 este reactanța de scăpări echivalentă a transformatorului și X_0 reactanța egalizorului de fază, ambele considerate la frecvența fundamentală.

La sarcina critică ($I_d = I_k$), cele două valori ale tensiunii medii redresate calculate mai sus sînt egale:

$$1,17 U - \frac{3}{2\pi} X_2 \frac{I_k}{2} = 1,35 U - \frac{6}{4\pi} (2 X_2 + X_0) I_k \quad (107.7)$$

din care se obține:

$$I_k = \frac{0,18 \cdot 4\pi}{9 X_2 + 6 X_0} U = \frac{2,26}{9 X_2 + 6 X_0} U \quad (107.8)$$

Dacă se neglijează reactanța de scăpări față de reactanța egalizorului de fază, se obține o formulă de calcul aproximativă:

$$I_k \approx \frac{2,26}{6 X_0} U = 0,377 \frac{U}{X_0} \quad (107.9)$$

Cu această formulă se poate calcula fie curentul critic I_k cînd se dă reactanța egalizorului X_0 , fie reactanța egalizorului X_0 necesară cînd se dă curentul critic.

Forma curenților anodici. Analizând situația arătată în fig. 204a, se poate scrie:

$$i_{s1} + I_{s0} = i_{a1} - i_{a4}; \quad (107.10)$$

$$i_{s2} + I_{s0} = i_{a3} - i_{a6}; \quad (107.11)$$

$$i_{s3} + I_{s0} = i_{a5} - i_{a2}; \quad (107.12)$$

deoarece fiecare din diferențele curenților anodici nu conține componente de curent continuu:

$$I_{s0} = 0, \quad (107.13)$$

din care rezultă că forțele magnetomotoare reziduale nu conțin nici ele componente continue.

Pe lângă aceasta, se mai poate scrie:

$$i_{s1} + i_{s2} + i_{s3} = i_{a1} - i_{a2} + i_{a3} - i_{a4} + i_{a5} - i_{a6}, \quad (107.14)$$

din care se poate spune că, astfel cum arată fig. 204d, această sumă este o componentă de armonică a treia egală cu de două ori curentul prin transformatorul interfază.

Deoarece acest curent este foarte mic, efectul său asupra curenților primari este neglijabil, deși el este indicat în fig. 204.

Fig. 204e reprezintă un curent primar

$$i_{11} = i_{s1} = i_{a1} - i_{a4}, \quad (107.15)$$

iar fig. 204b, curentul de linie:

$$i_a = i_{s1} - i_{s3} = i_{a1} + i_{a2} - i_{a4} - i_{a5}. \quad (107.16)$$

Tipuri de transformatoare utilizate. Deoarece forța magnetomotoare reziduală nu are o componentă continuă, transformatoarele monofazate sau transformatoarele polifazate tip manta pot avea o funcționare satisfăcătoare în acest circuit. Bobinajele primare ale transformatoarelor polifazate tip miez se pot lega în stea, însă, din cauza unei forțe magnetomotoare reziduale alternative, micii curenți sînt puțin modificați. Efectul curentului de excitație al transformatorului interfază este mic și depinde de construcția sa. Deoarece acest curent de excitație este independent de curentul de sarcină, el are un efect minim, atunci cînd sarcina este maximă și se poate neglija în calculul puterii aparente a transformatorului.

Valoarea eficace a curentului anodic. Fiecare anod poartă un curent $\frac{I_d}{2}$ pe un interval $\frac{2\pi}{3}$ dintr-o perioadă; astfel curentul anodic eficace rezultă din relația (94.4):

$$I_a = \frac{I_d}{2\sqrt{3}} \left[\sqrt{1-3\psi(\gamma)} \right]. \quad (107.17)$$

Din fig. 204e se deduce curentul primar:

$$I_1 = \sqrt{2} I_a = \quad (107.18)$$

$$= \frac{I_d}{\sqrt{6}} \left[\sqrt{1-3\psi(\gamma)} \right]. \quad (107.19)$$

Unghiul de suprapunere γ în fiecare din aceste expresii se poate determina din relația (94.5) cu condiția ca I_d din acea expresie să se înlocuiască cu $\frac{I_d}{2}$ deoarece fiecare anod poartă numai jumătate din curentul de sarcină și, prin urmare, curentul fiecărui bobinaj secundar variază numai cu $\frac{I_d}{2}$ în timpul comutației.

Tensiunea medie redresată. În mod analog se poate proceda pentru tensiunea medie redresată dată de relația (94.3). Valoarea lui m se ia 3, deoarece fiecare stea funcționează ca un redresor trifazat, în consecință tensiunea trifazată medie este:

$$U'_d = 1,17 U \left[\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad (107.20)$$

$$U'_d = 1,17 U - \left[\frac{3}{4\pi} I_d X_2 \right] \quad (107.21)$$

în care X_2 este reacțanța echivalentă de scăpări raportată la un bobinaj secundar. Cu raportul de transformare egal cu unitatea presupus aici, reacțanța echivalentă raportată la primar X_1 se poate egala cu X_2 , iar din (107.19) rezultă:

$$I_d = \sqrt{6} I_1 \left[\frac{1}{1-3\psi(\gamma)} \right]. \quad (107.22)$$

În consecință, tensiunea redresată medie se poate pune sub formă:

$$U'_d = 1,17 \left\{ U - \left[\frac{1}{2} \frac{1}{1-3\psi(\gamma)} I_1 X_1 \right] \right\}. \quad (107.23)$$

Puterea aparentă a secundarului transformatorului anodic este:

$$P_2 = 6 U I_a \quad (107.24)$$

și cu ajutorul relațiilor (107.17) și (107.20), aceasta se poate pune sub formă:

$$P_2 = \frac{\pi \sqrt{2}}{3} U'_d I_d \left[\frac{\sqrt{1-3\psi(\gamma)}}{\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \right] = \quad (107.25)$$

$$= 1,481 U'_d I_d \left[\frac{\sqrt{1-3\psi(\gamma)}}{\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \right]. \quad (107.26)$$

Puterea aparentă a primarului transformatorului anodic este

$$P_1 = 3 U I_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} P_2 = \quad (107.27)$$

$$= \frac{\pi}{3} U'_d I_d \left[\frac{\sqrt{1-3\psi(\gamma)}}{\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \right] = \quad (107.28)$$

$$= 1,017 U'_d I_d \left[\frac{\sqrt{1-3\psi(\gamma)}}{\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \right]. \quad (107.29)$$

În deducerea relațiilor de mai sus, curentul de excitație al transformatorului interfază a fost neglijat; în consecință forța magnetomotoare reziduală s-a presupus nulă și curentul de circulație în triunghiul primar nu există.

Puterea aparentă absorbită de la rețea. În aceste condiții puterea aparentă a primarului este egală cu puterea aparentă absorbită de la rețea, astfel expresia acestei puteri este:

$$P_1 = 1,047 U_1' I_d \left[\frac{\sqrt{1 - 3 \phi(\gamma)}}{\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right)} \right] \quad (107.30)$$

Deoarece curentul de excitație al transformatorului interfază dă naștere unui curent de circulație în triunghiul primar, dar nu adaugă nimic la curentii de linie, el poate să crească valoarea lui P_1 , dar nu modifică pe P_1 . Deci expresia (107.30) nu depinde de ipoteza unui curent de excitație neglijabil.

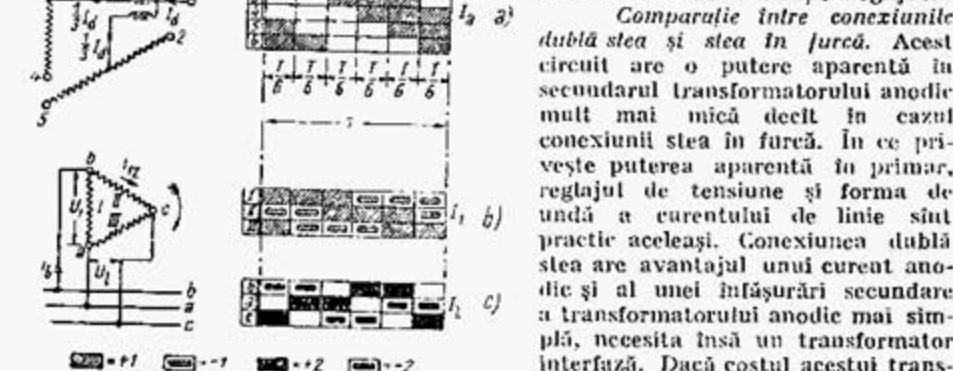


Fig. 207. - Circuit redresor triplu-monofazat: a - schema de principiu și tabela curentilor anodici sau secundari; b - schema de principiu a primarului și tabela curentilor primari; c - linia de alimentare și tabela curentilor de linie.

alt mod de egalizare a fazelor care se poate aplica unui sistem redresor hexafazat este arătat în fig. 207. Trei grupe de faze monofazate cu priză mediană sînt legate împreună printr-un egalizor de fază cu trei bobinaje și trei simbur. Fiecare grup monofazat poartă o treime din curentul redresat total.

Tensiunea secundară necesară. Deoarece grupul monofazat funcționează ca un redresor monofazat dublu-alternanță, deci cu $m = 2$, tensiunea de fază secundară este:

$$U_2 = \frac{\pi}{2 \sqrt{2}} \cdot \frac{U_{d0}}{\sin \left(\frac{\pi}{2} \right)} = 1,11 U_{d0} \quad (108.1)$$

Distribuția curenților anodici. În fig. 207a se arată distribuția curenților anodici (sau secundari). Pentru simplificare, comutația se presupune neglijabilă

și forma curentului anodic se admite dreptunghiulară de înălțime $\frac{1}{3} I_d$. Coeficienții indicați în partea de jos a figurii se aplică acestei mărimi $\frac{1}{3} I_d$. Se vede din tabela figurii 207a că fiecare curent anodic are o durată de $\frac{T}{2}$ sau 180° electrice și că în orice moment conduc simultan trei anodi, câte unul din fiecare grup de faze.

Valoarea eficace a curentului anodic dreptunghiular de mărime $\frac{1}{3} I_d$ și durată $\frac{T}{2}$

este:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} I_d \right)^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_d = 0,236 I_d \quad (108.2)$$

Valoarea eficace a curentului primar. Distribuția curenților primari este arătată în tabela din fig. 207b. Ținînd seamă de raportul de transformare al curenților de fază primari și secundari, care este U_2/U_1 și luînd media pătratică a valorilor indicate în tabelă se obține valoarea eficace a curentului primar:

$$I_1 = \sqrt{\frac{(1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2 + (-1)^2}{6}} \cdot \frac{I_d}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} = 0,333 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (108.3)$$

Din fig. 207c, se poate obține valoarea eficace a curentului de linie:

$$I_l = \sqrt{\frac{(2)^2 + (2)^2 + (-2)^2 + (-2)^2}{6}} \cdot \frac{I_d}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_d}{3} \cdot \frac{U_2}{U_1} = 0,544 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (108.4)$$

Puterea aparentă a secundarului. Din fig. 207a, se obține:

$$P_2 = 6 U_2 I_a = 6 \cdot 1,11 U_{d0} \cdot 0,236 I_d = 1,57 P_d \quad (108.5)$$

Puterea aparentă a primarului. Din fig. 207a, se obține:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 3 U_1 \cdot 0,333 I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} = 1,11 P_d \quad (108.6)$$

Puterea absorbită de la rețea. Din fig. 207c, se obține:

$$P_l = \sqrt{3} U_l I_l = \sqrt{3} U_l \cdot 0,544 I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} = 1,05 P_d \quad (108.7)$$

Din 207b, se vede că nu se poate utiliza un primar legat în stea, deoarece suma algebrică a curenților din faze nu este nulă la orice moment. Aceasta se vede și din faptul că raportul I_l/I_1 nu este $\sqrt{3}$.

Comparație cu alte conexiuni. După cum s-a arătat la § 106, puterea aparentă a unui egalizor de fază cu trei miezuri este $0,25 P_d$. Deci puterea aparentă medie a ansamblului acestei conexiuni este $1,59 P_d$, ceea ce reprezintă o creștere de 2,5% față de conexiunea hexafazată triunghi-stea, de 12% față de conexiunea hexafazată în furcă și de 18% față de conexiunea dublu-trifazată. Din acest motiv, conexiunea triplu-monofazată nu este aproape deloc întrebuintată, cu excepția

cazurilor în care avantajul unui curent anodic redus are o importanță practică. Raportul de reducere este 0,236/0,289 adică de 18%. De exemplu, un tub redresor cu șase anodi în balon de sticlă care poate conduce pe un anod un curent de 100 A eficient în mod continuu, poate da un curent redresat de numai 350 A, într-o conexiune dublu-trifazată, dar într-o conexiune triplu-monofazată poate da un curent redresat de 413 A. Bine înțeles, în acest al doilea caz, transformatorul în ansamblu este ceva mai mare.

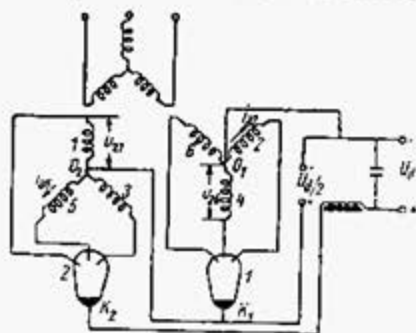


Fig. 208. — Conexiunea Vologdin.

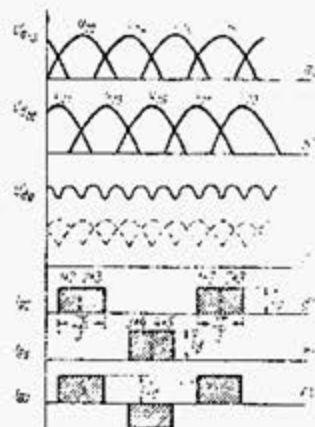


Fig. 209. — Tensiunile și curenții în conexiunea Vologdin: a — tensiunea redresată de grupul de faze 2-4-6; b — tensiunea redresată de grupul de faze 1-3-5; c — tensiunea redresată rezultantă; d — curentul prin înfășurarea secundară 2; e — curentul prin înfășurarea secundară 5; f — curentul prin înfășurarea primară 3.

109. Conexiunea Vologdin. Schema conexiunii. În fig. 208 este reprezentată conexiunea Vologdin, care cuprinde două grupe de faze formând două stele trifazate simetrice, identice. Fazele, 2, 4, 6 au tensiunea defazată cu 180° electrice față de fazele 1, 3, 5.

Fiecare grupă de faze alimentează un redresor, iar cele două redresoare sunt legate în serie.

Modul de funcționare al conexiunii. În fig. 209, a și b, se arată tensiunea redresată de redresorul 1 și 2. Ea se compune din alternanțele pozitive ale tensiunilor secundare (U_{21} , U_{23} , U_{25} și U_{22} , U_{24} , U_{26}).

Curentul printr-un tub curge când unul din anodi este pozitiv față de catod. Pe de altă parte, redresoarele fiind legate în serie, în orice moment conduc doi anodi, câte unul din fiecare redresor, iar tensiunea redresată totală este suma tensiunilor redresate individuale.

În fig. 209c, se arată însumarea tensiunilor redresate, iar în fig. 209d și e, forma curenților anodici i_{a2} și i_{a5} , în ipoteza unui reactor de netezire de inductanță mare și cu neglijarea fenomenului de comutație.

Se observă că deși durata unui curent anodic este 120°, deci ca la un redresor trifazat, pulsația tensiunii redresate are forma înțilnită la redresoarele hexafazate.

În fig. 209f, se arată forma curentului primar i_{13} , în ipoteza unui transformator ideal, cu raport de transformare.

Mărimi fundamentale ale redresării. Tensiunea redresată, este după cum s-a spus mai înainte, suma tensiunilor redresate și fiindcă fiecare redresor funcționează în trifazat, se poate scrie:

$$U'_{d0} = U'_{d10} + U'_{d20} = 2 \cdot 1,17 U_2 = 2,34 U_2. \quad (109.1)$$

Valoarea eficientă a curentului anodic rezultă imediat din fig. 209, d sau e, luând media patratică:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{3} I_d^2} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 0,58 I_d. \quad (109.2)$$

Valoarea eficientă a curentului primar rezultă analog din fig. 209f;

$$I_1 = \sqrt{\frac{2}{3} (n I_d)^2} = \sqrt{\frac{2}{3}} n I_d = 0,821 n I_d. \quad (109.3)$$

Puterea aparentă a secundarului este:

$$P_2 = 6 U_2 I_a = 6 \cdot \frac{U'_{d0}}{2,34} \cdot 0,58 I_d = 1,19 P_d. \quad (109.4)$$

Puterea aparentă a primarului este:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 3 \cdot \frac{U'_{d0}}{2,34 n} \cdot 0,821 n I_d = 1,05 P_d. \quad (109.5)$$

Avantaje și dezavantaje ale conexiunii. Printre avantajele conexiunii se enumeră:

- lipsa magnetizării continue în miezul transformatorului;
- posibilitatea obținerii unei tensiuni redresate simple sau duble;
- posibilitatea obținerii unei tensiuni redresate duble cu același tip de tub redresor, dar fiind că tensiunea inversă a circuitului se suportă de două tuburi în serie.

Dezavantajul principal constă în căderea de tensiune dublă pe cele trei tuburi în serie, de aceea conexiunea se recomandă în special pentru tuburi cu gaz.

110. Conexiunea Larionov sau conexiunea hexafazată în punte. Schema conexiunii. În fig. 210 este reprezentată conexiunea Larionov care cuprinde un singur grup de faze secundare trifazate legate în stea. Acest grup de faze alimentează două grupe de tuburi redresoare 1, 2, 3 și 1', 2', 3', primul având catodii legați împreună, al doilea având anodii legați împreună.

Prima grup de tuburi produce o tensiune redresată care apare la bornele K-O; al doilea grup de tuburi produce o tensiune redresată la bornele O-A, identică cu prima în ce privește forma și mărimea, dar defazată cu 60° electrice. Între bornele extreme K-A se obține suma acestor tensiuni, deci valoarea medie a acestei tensiuni este:

$$U_d = U_{d1} + U_{d2}. \quad (110.1)$$

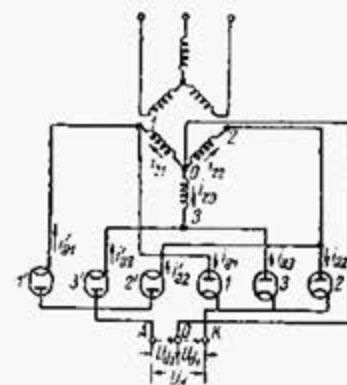


Fig. 210. — Conexiunea Larionov.

În fig. 211 este reprezentată aceeași conexiune ca în fig. 210, cu deosebire că tuburile sînt dispuse în schemă astfel încît să lase în evidență caracterul de

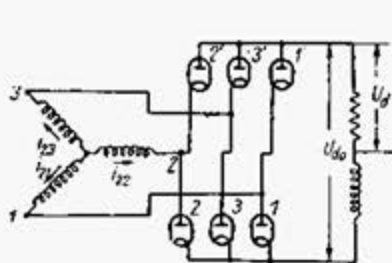


Fig. 211. — Conexiunea Larionov (alt mod de reprezentare).

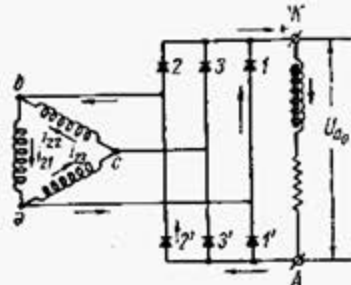


Fig. 212. — Conexiunea Larionov, cu secundarul transformatorului în triunghi.

punte al circuitului. În schema a doua, punctul neutru al secundarului transformatorului de alimentare nu este utilizat.

În această conexiune, existența punctului neutru O nu este esențială pentru funcționarea redresorului, cum era la toate conexiunile descrise în paragrafele precedente.

Din acest motiv, secundarul se poate lega în triunghi, cum se arată în fig. 212.

Modul de funcționare al conexiunii. Dacă se consideră fig. 210 sau 211, se vede imediat că din grupul de tuburi $1-2-3$, cu catodii la același potențial, va conduce la un moment dat acel tub care are potențialul anodic cel mai ridicat, deci cînd una din tensiunile de fază $u_{21}-u_{22}-u_{23}$ va fi pozitivă și mai mare decît celelalte două; din grupul de $1'-2'-3'$ cu anodii la același potențial, va conduce la un moment dat acel tub care are potențialul catodic cel mai scăzut, deci cînd una din tensiunile de fază $u_{21}-u_{22}-u_{23}$ va fi negativă și mai mare în valoare absolută decît celelalte două.

Cu această regulă este ușor de găsit distribuția curenților anodici arătată în fig. 213. În diagrama a sînt reprezentate tensiunile de fază secundare $u_{21}-u_{22}-u_{23}$; anvelopa creștelor pozitive constituie tensiunea redresată u_d , iar anvelopa creștelor negative constituie tensiunea redresată u_{d1} . Tensiunea u_{21} este pozitivă și predomină în intervalul $30-150^\circ$, deci atunci poate exista curențul anodic i_{a1} ; la fel se găsește situația în timp a curenților i_{a2} și i_{a3} .

Tensiunea u_{21} este negativă și predomină în intervalul $210-330^\circ$, deci atunci poate exista curențul anodic i'_{a1} ; la fel se găsește situația în timp a curenților i'_{a2} și i'_{a3} .

Curenții anodici se continuă în bobinajele secundarului legate în stea, deci se confundă cu curenții secundari. Din figură, se vede că i_{a1}, i_{a2}, i_{a3} formează alternanțele pozitive ale curenților de fază secundari și $i'_{a1}, i'_{a2}, i'_{a3}$, alternanțele negative.

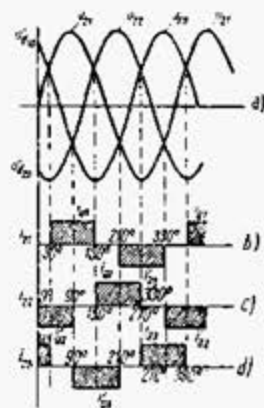


Fig. 213. — Curenții și tensiunile în conexiunea Larionov, cu transformatorul legat în stea:

a — forma de undă a tensiunii redresate u_d și u_{d1} ; b — curenții prin înfășurarea secundară 1 ; c — curenții prin înfășurarea secundară 2 ; d — curenții prin înfășurarea secundară 3 .

Deci curenții i_{a1}, i_{a2}, i_{a3} au forma din diagramele b, c, d . S-a presupus aici pentru simplificarea o inductanță teoretică infinită în circuitul de sarcină și un transformator fără reactanțe de scăpări, de aceea curenții apar sub formă dreptunghiulară. Luarea în considerare a efectului reactanțelor de scăpări se poate face foarte ușor aplicînd formulele generale de la § 91.

Se vede din fig. 213 că fiecare anod conduce 120° electrice, deci la fel ca la o conexiune trifazată. Curențul anodic trece simultan prin două tuburi în serie, aparținînd la cele două grupe diferite. Comutația curenților se face între doi anodi aparținînd la același grup. Examinînd fig. 213, b, c, d , se vede că succesiunea funcționării celor șase tuburi este următoarea: $(2' + 1) - (1 + 3') - (3' + 2) - (2 + 1') - (1' + 3) - (3 + 2') - (2' + 1)$.

Tensiunea redresată totală are forma din fig. 214, deci la fel ca la o conexiune hexafazată.

Funcționarea conexiunii în varianta din fig. 212 este similară cu cea descrisă mai sus, cu singura deosebire că forma curenților de fază secundari se modifică, astfel cum se arată în fig. 215. Pentru a se explica forma curenților de fază, se presupune momentul cînd tensiunea u_{ab} este pozitivă și maximă; atunci borna a este pozitivă și curențul curge pe drumul: tubul 1 — sarcina — tubul $2'$ — borna b . De la borna b , curențul se bifurcă $\frac{2}{3}$ în faza $(a - b)$ și $\frac{1}{3}$ în fazele $(b - c)$ și $(c - a)$ pe care le parcurge în serie și în sens negativ; în modul acesta se găsesc mărimile și semnele curenților i_{21}, i_{22}, i_{23} arătate în fig. 215, pe primul interval de 60° . În intervalul următor de 60° , tensiunea u_{ca} este maximă dar negativă, de aceea $i_{23} = -\frac{2}{3} I_d$, $i_{21} = \frac{1}{3} I_d$, și $i_{22} = \frac{1}{3} I_d$.

Mărimile fundamentale ale circuitului redresor. Cunoșcînd formele de undă ale curenților și tensiunilor se pot găsi valorile medii și eficace, precum și puterile aparente aplicînd regulile stabilite și aplicate în paragrafele precedente. Aceste mărimi se găsesc în tabela 13, după care se poate face și o comparație cu alte conexiuni.

Avantajele și dezavantajele conexiunii Larionov. Conexiunea Larionov ca și conexiunea Vologdin sînt indicate pentru redresarea tensiunilor înalte, pentru că tensiunea inversă a circuitului redresor se aplică la două tuburi care lucrează în serie. Cu alte cuvinte, pentru un tip de tub redresor dat, se poate redresa o tensiune de două ori mai mare cu conexiunea Larionov decît cu celelalte conexiuni hexafazate.

Alt avantaj este puterea de calcul a transformatorului de alimentare care este cea mai mică din toată seria de conexiuni examinate.

Dezavantajul principal constă în necesitatea de a avea patru surse separate pentru încălzirea catodilor. Trei din transformatoarele respective trebuie să fie izolate să reziste la întreaga tensiune redresată. Uneori se folosește un singur transformator pentru încălzirea catodilor, avînd patru bobinaje secundare izolate în od adecvat.

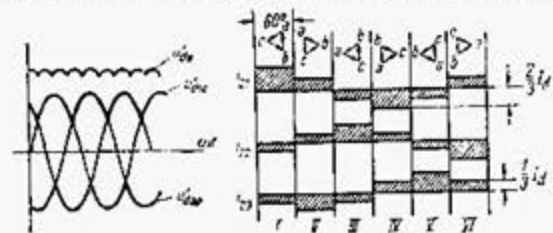


Fig. 214. — Tensiunea redresată rezultată în conexiunea Larionov.

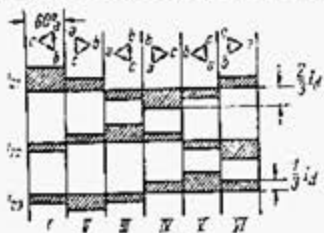


Fig. 215. — Curenții secundari în conexiunea Larionov, cu transformatorul legat în stea-triunghi.

Conexiunea Larionov exclude posibilitatea întrebuințării redresoarelor poli-anodice cu baie de mercur. Se folosesc de obicei gazotroane sau tiratruane în redresoarele de înaltă tensiune.

111. Conexiuni dodecafazate. Avantajele și dezavantajele conexiunilor dodecafazate. În paragrafele precedente s-au descris numai conexiunile care dau circuitului redresor un caracter hexafazat. Mai departe se vor examina anumite conexiuni în care procesul de multiplicare al fazelor este dus mai departe cu scopul ca efectul dăunător al armonicilor produse de redresor să devină neglijabil. Avantajele unui sistem dodecafazat sînt duble. În primul rînd, tensiunea redresată este aproape constantă chiar în cazul unei sarcini pur rezistive cînd curenții anodici nu mai sînt dreptunghiulari, ci au forma unor arcuri de sinusoidă. În cazul unor redresoare hexafazate, deviația maximă a tensiunii redresată de la o valoare medie este de aproximativ 6 %, pe cînd în cazul unui redresor dodecafazat ea se reduce la 1,5 %. În al doilea rînd, curențul absorbit de redresor de la rețeaua de alimentare, este practic sinusoidal. Pe cînd în cazul redresorului hexafazat factorul de distorsiune ¹⁾ a curențului absorbit este 0,95, el devine în cazul redresorului dodecafazat 0,99.

Principalul dezavantaj al sistemului dodecafazat este factorul de utilizare mic al transformatorului. De exemplu, factorul de utilizare în cazul unui sistem simplu hexafazat este 0,552, care reprezintă o reducere de 18 % sub valoarea maximă posibilă de 0,675 care se obține pentru $m = 3$, pe cînd în cazul sistemului dodecafazat simplu acest factor de utilizare scade la 0,404, ceea ce reprezintă o reducere de 40 % sub maximul posibil.

Un alt dezavantaj important al sistemului dodecafazat este construcția complicată a bobinajelor transformatorului.

Sistemul simplu dodecafazat nu are avantaje pentru aplicații practice. S-au imaginat multe metode ingenioase de combinare a fazelor cu scopul de a furniza o conexiune secundară dodecafazată.

Din cauza construcției costisitoare și a multor dificultăți constructive înfrînte la astfel de transformatoare dodecafazate, este foarte dificil să se găsească vreo justificare reală alta, decît lipsa relativă de armonice pe partea de curent alternativ, pentru vreo abatere de la practica normată hexafazată. După cum s-a menționat mai sus, armonicile reziduale pe partea de curent alternativ au o mărime relativ mică și deci curențul de linie este practic sinusoidal. Aceasta este caracteristica redresorului dodecafazat, care, mai mult decît oricare alta, îl face superior redresorului hexafazat. Luarea în considerare a utilizării unui sistem dodecafazat este necesară numai atunci cînd efectul cumulativ al armonicilor produs de redresor pe rețeaua de alimentare este important, ca de exemplu în cazul unui sistem de tracțiune în curent continuu important, alimentat numai din substații de redresare.

112. Conexiunea dodecafazată în furcă. Schema conexiunii. Circuitul dodecafazat în furcă din fig. 216 este o dezvoltare a circuitului hexafazat în furcă discutat la § 105 și reprezintă metoda cea mai economică posibilă de combinație a fazelor, cînd se cere o redresare simplă dodecafazată a unui sistem de alimentare trifazat. Cu acest tip de conexiune, fiecare fază a redresorului poartă întregul curent de sarcină numai a 12-a parte dintr-o perioadă, adică 30° electrice. În afară de un factor de utilizare prost care rezultă dintr-o astfel de perioadă scurtă a curențului prin bobinaj, conexiunea dodecafazată în furcă are dezavantajul că ea se poate utiliza numai cu un primar legat în triunghi. Cu o conexiune în stea în primar, echilibrarea amperspirelor primare și secundare nu este completă, de aceea rezultă o forță magnetomotrice reziduală alternativă de frecvență 3f, ca în cazul unui circuit simplu hexafazat.

¹⁾ Definiția factorului de distorsiune se găsește la § 125.

Tensiunile secundare. Referindu-ne la diagrama din fig. 216a, se vede că tensiunile de fază U_2 se obțin prin combinarea tensiunilor U și U' ale bobinajelor secundare exterioare și interioare dispuse pe cele trei ramuri ale miezului transformatorului. Relația dintre aceste tensiuni este:

$$\frac{U_2}{\sin 120^\circ} = \frac{U}{\sin 15^\circ} = \frac{U'}{\sin 45^\circ} \quad (112.1)$$

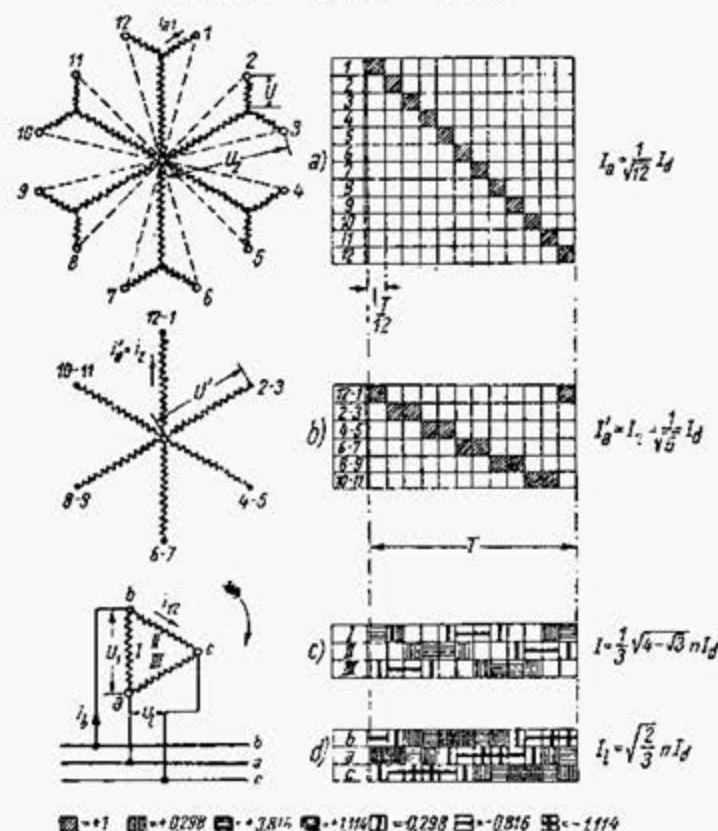


Fig. 216. — Conexiune dodecafazată în furcă:

a — schema de principiu a înfășurării secundare și tabela curenților anodici; b — schema bobinajelor interioare și tabela curenților secundari; c — schema bobinajului primar și tabela curenților primari; d — linia de alimentare și curenții de linie.

din care;

$$U = \frac{U_2 \sin 15^\circ}{\sin 120^\circ} = \frac{U_2 (\sqrt{3} - 1)}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 0,298 U_2, \quad (112.2)$$

și:

$$U' = \frac{U_2 \sin 45^\circ}{\sin 120^\circ} = \frac{U_2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 0,816 U_2. \quad (112.3)$$

În cazul unui redresor simplu dodecafazat $m = 12$, tensiunea de fază secundară este dată de relația (73.3):

$$U_2 = \frac{\pi}{12} \frac{U'_{d0}}{2 \sin(\pi/12)} = 0,715 U'_{d0}. \quad (112.4)$$

Valoarea eficace a curenților anodici. Distribuția curenților anodici este arătată în fig. 216 a din care se vede că valoarea eficace este:

$$I_a = \sqrt{\frac{(1)^2}{12}} I_d = 0,289 I_d. \quad (112.5)$$

Valoarea eficace a curenților secundari. Curentul secundar corespunzător are distribuția arătată în fig. 216b. Ca în cazul conexiunii hexafazată în furcă, fiecare fază secundară (ramura interioară) alimentează doi anodi consecutivi pentru fiecare perioadă a tensiunii, astfel încât valoarea eficace a curentului secundar este:

$$I_2 = I_a = \sqrt{\frac{(1)^2 + (1)^2}{12}} I_d = 0,408 I_d. \quad (112.6)$$

Distribuția curenților primari. Distribuția curenților primari corespunzător se vede în fig. 216c și se obține din diagramele precedente a și b, în modul următor:

Se consideră mai întâi toate bobinajele exterioare ale secundarului. Dacă amperspirele primare și secundare trebuie să se echilibreze, atunci relația dintre curentul primar și secundar trebuie să fie invers proporțională cu numărul spirelor și deci egală cu $\frac{U_1}{U_2} = 0,298 \frac{U_2}{U_1}$. În mod analog, considerând porțiunile interioare ale bobinajului secundar, raportul corespunzător al curenților primari și secundari este $\frac{U_1}{U_2} = 0,816 \frac{U_2}{U_1}$. Diagrama c se obține atunci în modul obișnuit prin însumarea curenților instantanei arătați în diagramele a și b, ținând seamă de semnul acestor curenți și raportul de transformare arătat mai sus.

De exemplu, în timpul primului interval de $1/12$ dintr-o perioadă, faza primară c-a poartă un curent i_{13} care corespunde la curentul anodului 1 așa cum arată diagrama a. Curentul i_{13} este egal cu i_a , multiplicat cu raportul $\frac{U_1}{U_2}$.

Deoarece în acest caz sensul de curgere al curentului i_a în ramura exterioară 1 a secundarului este opus sensului pozitiv de curgere al curentului i_{13} în bobinajul primar, curentul instantaneu i_{13} se poate considera aici negativ și valoarea sa este $-0,298 I_d \frac{U_2}{U_1}$. În același timp, faza primară a-b poartă un curent care corespunde la curentul secundar $i_2 = i_a$ din faza $(12-1)$, arătat în diagrama b și este egal cu acest curent multiplicat cu raportul $\frac{U_1}{U_2}$. În acest caz, sensul curentului

i_2 în bobinajul secundar $(12-1)$ coincide cu sensul pozitiv al curentului i_{11} din bobinajul primar, astfel încât curentul instantaneu i_{11} se poate considera pozitiv și valoarea sa este $+0,816 I_d \frac{U_2}{U_1}$. Continuând acest raționament, se găsesc valorile indicate în tabela din fig. 216c.

Valoarea eficace a curenților primari. Valoarea eficace I_1 a curentului instantaneu i_{11} se găsește luând media pătratelor valorilor din tabelă:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{12} [(0,816)^2 + (0,298)^2 + (-0,298)^2 + (-0,816)^2 + (-0,816)^2 + (-0,298)^2 + (-0,298)^2 + (0,816)^2]} I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{3} \sqrt{1 - \sqrt{3}} \cdot I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} = 0,502 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (112.7)$$

Conexiunea fiind simetrică, ceilalți curenți i_{12} și i_{13} au aceeași valoare eficace.

Distribuția curenților de linie. Distribuția curenților de linie dată în fig. 216d se obține în mod obișnuit prin însumarea algebrică a curenților de fază primari, ținând seamă de succesiunea fazelor și de sensul curentului din bobinaj. Luând curenți de linie prin rotație se poate scrie:

$$i_a = i_{11} - i_{12}; \quad (112.8)$$

$$i_b = i_{12} - i_{13}; \quad (112.9)$$

$$i_c = i_{13} - i_{11}. \quad (112.10)$$

Valoarea eficace a curenților de linie. Valoarea eficace este în consecință:

$$I_l = \sqrt{\frac{1}{12} [(-0,816)^2 + (-0,298)^2 + (0,298)^2 + (0,816)^2 + (1,111)^2 + (1,111)^2 + (0,816)^2 + (0,298)^2 + (-0,298)^2 + (-0,816)^2 + (-1,111)^2 + (-1,111)^2]} I_d \frac{U_2}{U_1} =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,816 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (112.11)$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,816 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (112.12)$$

Puterea aparentă a secundarului. Puterea aparentă a secundarului este dată de relația:

$$P_2 = 12 U I_a + 6 U' I_a' = 6 I_d \cdot 0,715 U'_{d0} [(2 \cdot 0,298 \cdot 0,298) + (0,816 \cdot 0,408)]. \quad (112.13)$$

$$= 2,17 P_d. \quad (112.14)$$

Puterea aparentă a primarului. Puterea aparentă a primarului este dată de relația:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 3 U_1 \cdot 0,502 I_d \frac{U_2}{U_1} = 1,08 P_d. \quad (112.15)$$

Puterea aparentă absorbită de la rețea. Puterea aparentă absorbită de la rețea este:

$$P_{1+} = \sqrt{3} U_l I_l = \sqrt{3} U_l \cdot 0,816 I_d \frac{U_2}{U_l} = 1,01 P_l. \quad (112.16)$$

Comparație cu alte conexiuni. Puterea medie a transformatorului redreso-
rului are valoarea $1,625 P_d$ la această conexiune dodecafazată. În același timp, este
interesant de observat că factorul de utilizare a bobinajului secundar este 0,46, în
comparație cu 0,40 din cazul sistemului dodecafazat cu conexiune în stea. Câștigul
obținut datorită combinației fazelor este, în acest caz, 15 %, pe cînd în cazul con-
exiunii hexafazate în furcă, câștigul este de numai 1,5 %.

Referindu-ne la fig. 216c, se vede că suma algebrică a curenților de fază
primari în fiecare moment al perioadei, nu este egală cu zero, astfel încît nu se poate
utiliza un bobinaj primar legat în stea. Din acest punct de vedere, conexiunea dode-
cafazată în furcă, diferă mult de conexiunea hexafazată echivalentă, în care se
constată o simetrie a curenților primari. În plus, raportul dintre curenții de linie
și curenții primari nu mai este $\sqrt{3}$, un fapt care confirmă asimetria.

113. Conexiunea cvadro-trifazată. Schema conexiunii. Dezavantajele fac-
torului de utilizare mic al conexiunii dodecafazate în furcă descrise mai sus au făcut
necesară introducerea unor conexiuni mai complicate care folosește principiul
egalizării de fază între mai multe grupe trifazate, cvadrofazate sau hexafazate. Din
aceste sisteme în fig. 217 se arată circuitul cvadro-trifazat care este cel mai bine cu-
noscut și cel mai des utilizat în practică, deși el cere trei egalizoare de fază. Sistemul
se compune din patru sisteme distincte trifazate în zig-zag, defazate între ele cu
 90° electrice. Punctele neutre a două din aceste sisteme sînt legate între ele prin
un egalizor de fază A și cele ale celorlalte două sisteme sînt legate între ele prin
alt egalizor de fază B.

Modul de funcționare al schemei. Fiecare pereche de sisteme trifazate astfel
formată, funcționează ca un sistem hexafazat, dar pe principiul sistemului dublu
trifazat discutat la § 107. Cele două sisteme hexafazate astfel formate sînt, la rîndul
lor, defazate cu 90° electrice prin intermediul celui de al treilea egalizor de fază
C, legat între punctele lor neutre. Primele două egalizoare de fază funcționează la o
frecvență $3f$, pe cînd al treilea folosește armonicele $6f$, pentru a compensa diferența
de tensiune dintre cele două sisteme hexafazate și a da astfel caracterul dodecafazat
circuitului în ansamblu.

Referindu-ne la fig. 217a, se vede că sistemele trifazate care conțin grupurile
de anodi 1-5-9 și 3-7-11, sînt în antifază, și, în consecință, funcționează
împreună, ca un sistem hexafazat. Același lucru se întîmplă cu sistemele trifazate
care conțin anozii 2-6-10 și 4-8-12. Cele două sisteme hexafazate formate în
acest mod și conținînd grupurile de anodi 1-3-5-7-9-11 și 2-4-6-8-10-12
sînt în cvadratură și astfel, la rîndul lor se combină pentru a forma un sistem cu
caracter dodecafazat.

Valoarea eficace a curenților anodici. Cu acest aranjament al grupurilor de
anozi, într-un sistem cvadro-trifazat există întotdeauna patru anodi, — câte unul
din fiecare grupă, — care poartă curentul la un moment dat, astfel încît fiecare
anod poartă $1/4$ din curentul redresat I_d în timpul $1/2$ din perioadă, adică 120°

electrice. Valoarea eficace a curenților anodici este deci numai $\frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{3}} I_d$ față de

valoarea $\sqrt{\frac{1}{12}} I_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{3}} I_d$ din cazul conexiunilor simple dodecafazate. Această
proprietate constituie un alt avantaj în favoarea sistemelor redresoare compuse
de acest tip.

Tensiunea secundară necesară. Ca și în cazul sistemului dodecafazat în furcă,
tensiunile de fază U_2 se obțin printr-o combinație de fază a tensiunilor U și U'
de pe porțiunile exterioare și interioare ale bobinajelor secundare. Prin urmare, ca

mai înainte $U = 0,298 U_2$ și $U' = 0,816 U_2$. Dar, în acest caz, tensiunea de fază
secundară este cea care corespunde funcționării în trifazat cu $m = 3$ și în consecință
valoarea sa eficace este:

$$U_2 = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \frac{U'_d}{\sin(\pi/3)} = 0,855 U'_d. \quad (113.1)$$

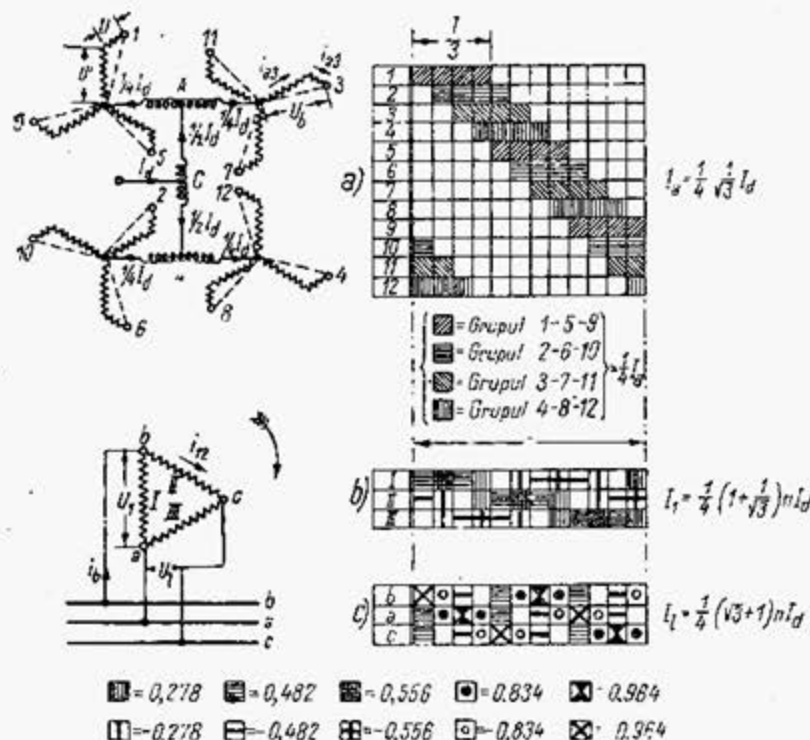


Fig. 217. — Conexiunea cvadro-trifazată:
a — schema de principiu a bobinajelor secundare inclusiv egalizoarele de fază și tabelul
curenților anodici sau secundari; b — schema bobinajelor primare și curenții primari;
c — linia de alimentare și curenții de linie.

Valoarea eficace a curenților secundari. Din distribuția curenților anodici
(sau secundari) dată de fig. 217a, se vede că valoarea lor eficace este:

$$I_2 = I_a = \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2]} \cdot \frac{1}{4} I_d = 0,145 I_d. \quad (113.2)$$

Distribuția curenților primari. Distribuția curenților primari corespunzător
arătată în fig. 217b, se obține din diagrama a astfel: se consideră de exemplu acea
porțiune a perioadei în care anozii 1, 2, 3 și 4 conduc simultan. Luînd cazul anodului
1 și ținînd seama de faptul că raportul între curenții primari și secundari este ca
mai înainte, $0,298 U_2/U_1$ pentru bobinajele exterioare și $0,816 U_2/U_1$ pentru

bobinajele interioare ale secundarului, curenții primari corespunzători curenților secundari din bobinajele interioare și exterioare, sînt, respectiv:

$$\left(+ \frac{1}{4} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1} \right) \text{ în faza } a-b \text{ și } \left(- \frac{1}{4} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1} \right) \text{ în faza } c-a.$$

În mod analog, curenții primari corespunzători curenților anodului 3 sînt $\left(+ \frac{1}{4} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1} \right)$ în faza $a-b$ și $\left(- \frac{1}{4} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1} \right)$ în faza $c-a$. Dacă se consideră anodul 3, curenții primari corespunzători curenților secundari din bobinajele interioare și exterioare sînt respectiv: $\left(- \frac{1}{4} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1} \right)$ în faza $c-a$ și

$$\left(+ \frac{1}{4} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1} \right) \text{ în faza } b-c. \text{ În sfîrșit, luînd anodul 4, curenții primari res-}$$

pectivi sînt $\left(+ \frac{1}{4} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1} \right)$ în faza $b-a$ și $\left(- \frac{1}{4} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1} \right)$ în faza $c-a$.

Valoarea instantanee a curenților primari. Adunînd curenții de fază corespunzători, se găsește că în intervalul de timp cînd anozii 1, 2, 3 și 4 poartă împreună curențul redresat I_d , curenții primari instantanei sînt:

$$i_{11} = \left(\frac{\sqrt{3} + 1}{4\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,278 I_d \frac{U_2}{U_1}; \quad (113.3)$$

$$i_{12} = \left(\frac{\sqrt{3} + 1}{4\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,278 I_d \frac{U_2}{U_1}; \quad (113.4)$$

$$i_{13} = - \left(\frac{\sqrt{3} + 1}{2\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = -0,556 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (113.5)$$

Valoarea eficace a curenților primari. Din fig. 217b, se vede că valoarea eficace a curenților primari este:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{12} [(0,482)^2 + (0,556)^2 + (0,482)^2 + (0,278)^2 + (-0,278)^2 +$$

$$+ (-0,482)^2 + (-0,556)^2 + (-0,482)^2 + (-0,278)^2 + (0,278)^2]} I_d \frac{U_2}{U_1} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} + 1}{4\sqrt{3}} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,395 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (113.7)$$

Distribuția curenților de linie. Distribuția curenților de linie arătată în fig. 217c, se obține în modul obișnuit din relațiile

$$i_a = i_{11} - i_{13}; \quad i_b = i_{12} - i_{11}; \quad i_c = i_{13} - i_{12}. \quad (113.8)$$

Valoarea eficace a curenților de linie. Valoarea eficace a curenților de linie se obține în consecință din:

$$I_l = \sqrt{\frac{1}{12} [(-0,964)^2 + (-0,834)^2 + (-0,482)^2 + (0,482)^2 + (0,834)^2 +$$

$$+ (0,964)^2 + (0,834)^2 + (0,482)^2 + (-0,482)^2 + (-0,834)^2]} I_d \frac{U_2}{U_1} =$$

$$= \frac{\sqrt{3} + 1}{4} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,682 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (113.10)$$

Puterea aparentă a secundarului. Din fig. 217a se vede că puterea aparentă a bobinajului secundar este:

$$P_2 = 12 U I_a + 12 U' I_a' = 12 \cdot 0,145 I_d \cdot 0,855 U_{d0}' (0,298 + 0,816) = 1,65 P_d. \quad (113.11)$$

Puterea aparentă a primarului. În mod analog, din fig. 217b, puterea aparentă a bobinajului primar este:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 3 U' \cdot 0,395 I_d \frac{U_2}{U_1} = 1,01 P_d. \quad (113.12)$$

Puterea aparentă absorbită de la rețeaua de curent alternativ. Din fig. 217c, se vede că puterea absorbită este:

$$P_l = \sqrt{3} U_l I_l = \sqrt{3} U_l \cdot 0,682 I_d \frac{U_2}{U_1} = 1,01 P_d. \quad (113.13)$$

Puterea aparentă a egalizatoarelor. Cele două egalizoare de fază -- A și B -- funcționează exact în același mod ca egalizorul de fază din sistemul dublu trifazat analizat în § 107. Puterea lor aparentă este însă numai jumătate din puterea egalizorului de fază din cazul conexiunii hexafazate, deoarece fiecare poartă un curent $\frac{1}{2} I_d$, în loc de $\frac{1}{2} I_d$. Puterea aparentă de armonica a treia a fiecărui egalizor este deci:

$$2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{d0}'}{4} \cdot \frac{I_d}{4} = \frac{1}{24} P_d. \quad (113.14)$$

Funcțiunea egalizorului al treilea C este de a egaliza diferența de potențial instantanee dintre cele două sisteme hexafazate, constituită de cele două grupe de faze 1-3-5-7-9-11 și 2-4-6-8-10-12. Tensiunea pe fiecare din cele două bobinaje ale sale fiind diferența dintre potențialele medii ale acestor două grupe de faze și tensiunea de fază a unuia din sistemele hexafazate, are deci tot forma triunghiulară și, în acest caz, amplitudinea sa este deci aproximativ $\frac{1}{16} [\sqrt{2} U_2]$ și

valoarea eficace se poate lua egală cu $\frac{1}{16} U_{d0}'$. Această tensiune este produsă de un

curent de magnetizare de armonica a șasea suprapus pe curentul continuu care curge în bobinajele egalizorului de fază, astfel încît privind acest egalizor ca un transformator obișnuit cu două bobinaje, funcționînd la frecvența rețelei de alimentare, puterea sa aparentă echivalentă este:

$$2 \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{U_{d0}'}{16} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{1}{96} P_d. \quad (113.15)$$

Comparație cu alte conexiuni. Puterea aparentă nominală echivalentă a celor trei egalizoare este $0,09 P_d$, astfel încît puterea aparentă medie a ansamblului conexiunii este $1,42 P_d$, care apare destul de favorabilă în comparație cu cifra $1,35 P_d$ obținută la sistemul dublu trifazat. În orice caz, ea reprezintă o reducere de 13% în comparație cu conexiunea dodecafazată în furcă.

Este interesant de menționat că sistemul cvadro-trifazat permite, de asemenea, utilizarea unui primar legat în stea, după cum se poate vedea din fig. 217b. În acest caz se găsește de asemenea că puterea nominală este aceeași cu cea găsită

În cazul conexiunii în triunghi a primarului. Suma algebrică a curenților de fază în bobinajul primar este nulă în orice moment, ceea ce este evident din faptul că valoarea eficace a curențului de linie este egală cu de trei ori valoarea curențului primar.

114. Conexiunea triplu-evadrozafată. Schema conexiunii. După cum conexiunea precedentă s-a considerat ca rezultând dintr-un sistem dublu trifazat al unui

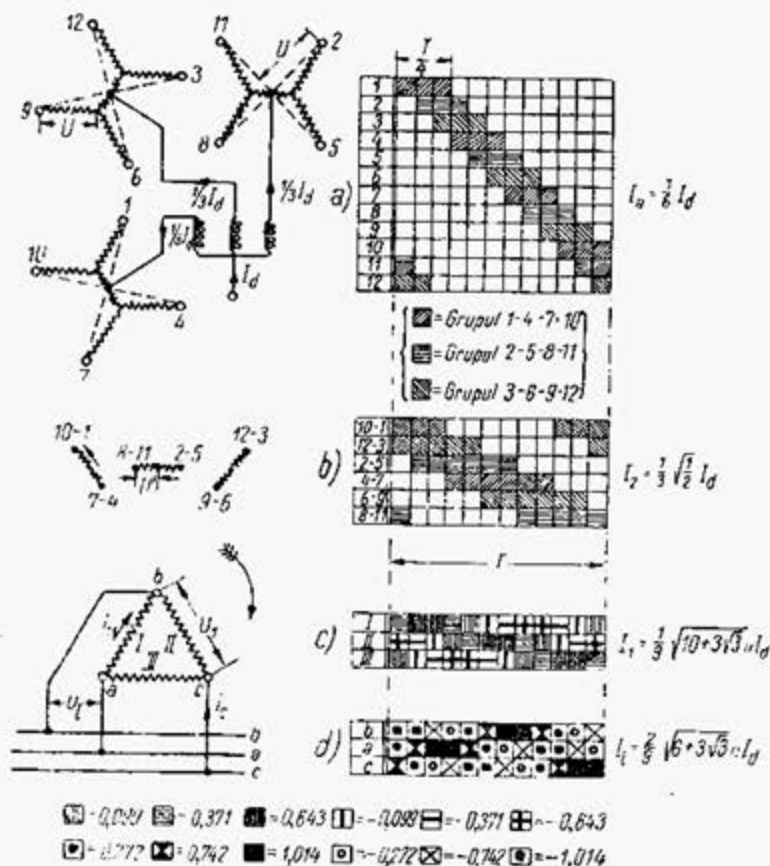


Fig. 218 - Conexiunea triplu-evadrozafată:

a - schema de principiu a bobinajelor secundare, inclusiv egalizoarele de fază, și tabelele curenților anodici; b - bobinajele secundare interioare și tabela curenților secundari; c - bobinajele primare și tabela curenților primari; d - linia de alimentare și curenții de linie.

redresor hexafazat, tot astfel sistemul triplu-evadrozafat din fig. 218 se poate privi ca dezvoltarea logică a sistemului triplu-monofazat analizat la § 108. El se compune din trei sisteme distincte evadrozafate în furcă, defazate între ele cu 120° electrice și având punctele lor neutre legate prin trei egalizoare de fază. În această conexiune

a grupurilor de anodi există totdeauna trei anodi - cile unul din fiecare grupă - care poartă curențul la un moment dat. Astfel, fiecare anod poartă $\frac{1}{3}$ din curențul total redresat I_d în timpul unui sfert de perioadă, sau 90° electrice. Valoarea eficace a curențului anodic este deci $\frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{4} I_d}$ în comparație cu $\frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{3} I_d}$ din cazul conexiunii evadrozafate, deci este mai mare cu 15%.

Tensiunea secundară necesară. Ca și în cazul celor două conexiuni anterioare, tensiunile de fază individuale U_2 se obțin printr-o combinație de fază a tensiunilor U și U' , de pe ramurile exterioare și interioare ale bobinajelor secundare. În cazul de față după cum se poate vedea din fig. 218a, există relațiile $U = 0,816 U_2$ și $U' = 0,298 U_2$. Tensiunea de fază secundară corespunde unei funcționări evadrozafate, cu $m = 4$, astfel încât valoarea ei eficace este:

$$I_2 = \frac{\pi}{4 \sqrt{2} \sin(\pi/4)} \frac{I'_{da}}{I_{da}} = 0,785 U'_{da} \quad (114.1)$$

Valoarea eficace a curenților anodici. Din distribuția curenților anodic arătată în fig. 218a se poate calcula valoarea eficace a curenților anodici:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (1)^2 + (1)^2]} \cdot \frac{1}{3} I_d = 0,167 I_d \quad (114.2)$$

Valoarea eficace a curenților secundari. Din cauza conexiunii în furcă a fiecărui sistem evadrozafat, porțiunile interioare ale bobinajelor secundare sînt de două ori mai mult utilizate decît bobinajele exterioare. Aceasta se vede din distribuția curenților secundari arătată în fig. 218b, după care se poate scrie:

$$I_2 = I_a = \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2]} \cdot \frac{1}{3} I_d = 0,236 I_d \quad (114.3)$$

Distribuția curenților primari. Distribuția corespunzătoare a curenților primari este arătată în fig. 218c și se obține astfel: se consideră de exemplu acea porțiune a perioadei în care anozii 1, 2 și 3 conduc simultan; după diagrama a, raportul curenților de fază primari și secundari este $(0,816 U_2/U_1)$ pentru ramurile exterioare și $(0,298 U_2/U_1)$ pentru ramurile interioare, astfel încît considerînd în primul rînd anodul 1, atunci curenții primari corespunzători curențului din ramurile interioare și exterioare ale bobinajului secundar sînt, respectiv $\left(-\frac{1}{3} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza b-c, și $\left(\frac{1}{3} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza a-b. În mod analog, curenții primari care curg datorită curențului din bobinajele legate la anodul 2 sînt $\left(-\frac{1}{3} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza c-a și $\left(\frac{1}{3} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza b-c. Dacă se consideră anodul 3, curenții primari care corespund curențului din ramurile interioare și exterioare ale bobinajelor secundare din circuitul anodic sînt $\left(\frac{1}{3} I_d \cdot 0,298 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza a-b și $\left(-\frac{1}{3} I_d \cdot 0,816 \frac{U_2}{U_1}\right)$ în faza c-a.

Valoarea instantanee a curenților primari. Adunând curenții de fază corespunzători se găsește că în intervalul de timp când anozii 1, 2 și 3 poartă împreună curentul total redresat I_d , curenții primari instantanei sînt:

$$i_{11} = \left(\frac{\sqrt{3} + 1}{3\sqrt{2}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,643 I_d \frac{U_2}{U_1}, \quad (114.4)$$

$$i_{12} = \left(\frac{\sqrt{3} - 1}{3\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = -0,099 I_d \frac{U_2}{U_1}, \quad (114.5)$$

$$i_{13} = \left(\frac{\sqrt{3} + 1}{3\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = -0,371 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (114.6)$$

Valoarea eficace a curenților primari. Din fig. 216c, se vede că valoarea eficace a curenților primari este:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{12} [(0,371)^2 + (0,643)^2 + (0,643)^2 + (0,371)^2 + (0,099)^2 + (-0,099)^2 + (-0,371)^2 +$$

$$+ (-0,643)^2 + (-0,643)^2 + (-0,371)^2 + (-0,099)^2 + (0,099)^2]} \cdot I_d \frac{U_2}{U_1} =$$

$$= \frac{1}{9} \sqrt{10 + 3\sqrt{3}} \cdot I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,133 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (114.7)$$

$$(114.8)$$

Distribuția curenților de linie. Distribuția curenților de linie arătată în fig. 218d, se obține în modul obișnuit din relațiile:

$$i_a = i_{11} - i_{12}; \quad i_b = i_{12} - i_{13}; \quad i_c = i_{13} - i_{11}. \quad (114.9)$$

Valoarea eficace a curenților de linie. Valoarea eficace este, în consecință, dată de:

$$I_l = \sqrt{\frac{1}{12} [(-1,014)^2 + (-1,014)^2 + (-0,742)^2 + (-0,272)^2 + (0,272)^2 + (0,742)^2 +$$

$$+ (1,014)^2 + (1,014)^2 + (0,742)^2 + (0,272)^2 + (-0,272)^2 + (-0,742)^2]} \cdot I_d \frac{U_2}{U_1} = \quad (114.10)$$

$$= \frac{2\sqrt{3}}{9} \sqrt{2 + \sqrt{3}} \cdot I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,743 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (114.11)$$

Puterea aparentă a secundarului. Din fig. 218a, rezultă puterea aparentă a bobinajului secundar:

$$P_2 = 12 U I_a + 6 U_a I_a = 12 \cdot 0,816 U_2 \cdot 0,167 I_d + 6 \cdot 0,298 U_2 \cdot 0,236 I_d = \quad (114.12)$$

$$= (1,632 + 0,419) U_2 I_d = 2,051 \cdot 0,785 U_d I_d = 1,61 P_d. \quad (114.13)$$

Puterea aparentă a primarului. În mod analog din fig. 218a, puterea aparentă a secundarului este:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 = 3 U_1 \cdot 0,433 I_d \frac{U_2}{U_1} = 1,02 P_d. \quad (114.14)$$

Puterea aparentă absorbită de la rețeaua de curent alternativ. Din fig. 218d, puterea aparentă absorbită este:

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 = \sqrt{3} U_1 \cdot 0,743 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (114.15)$$

Puterea aparentă a egalizorului. Egalizorul de fază funcționează exact în același mod ca egalizorul de fază cu trei miezuri utilizat în conexiunea triplu-mono-fază, dar în cazul de față, tensiunea pe fiecare din cele trei bobinaje ale sale fiind diferența dintre media potențialelor tuturor celor trei grupe de faze (1-4-7-10, 2-5-8-11 și 3-6-9-12) și tensiunea de fază a unuia din sistemele cuadrofazate, are o frecvență 4f, iar valoarea sa eficace este de aproximativ $\frac{1}{8} U_d$. Deci,

privind egalizorul de fază ca un autotransformator obișnuit cu trei bobinaje funcționând la frecvența de alimentare, puterea sa aparentă echivalentă este:

$$3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{U_d}{8} \cdot \frac{I_d}{3} = \frac{1}{32} P_d. \quad (114.16)$$

Comparație cu alte conexiuni. Puterea aparentă medie a ansamblului conexiunii este deci $\frac{1}{35} P_d$ pentru conexiunea triplu cvadro-fază în comparație cu

1,42 P_d pentru conexiunea cvadro-trifază. Utilizarea primului circuit este deci mai bună cu 5%, pe cînd reducerea puterii medii în comparație cu conexiunea dodecafază în furcă este de 17%.

Referindu-ne la fig. 218c, se vede că suma algebrică a curenților de fază primari în orice moment al perioadei nu este nulă de aceea nu se poate utiliza un bobinaj primar legat în stea. Aceasta se confirmă prin faptul că raportul dintre curenții de linie și curenții primari nu este $\sqrt{3}$.

115. Conexiunea dublu-hexafază. Schema conexiunii. Conexiunea dublu-hexafază este în fond un compromis între conexiunile arătate mai sus, prin aceea că ea reprezintă o conexiune de transformatoare care nu este nici prea complicată în ce privește combinația de faze și nici nu consumă prea multă putere aparentă în egalizoarele de fază. Ea dă în același timp un caracter dodecafază sistemului redresor în ansamblu. Această conexiune este o dezvoltare logică a conexiunii hexafaze în furcă, dar metoda de combinație a fazelor utilizată pentru a obține două sisteme hexafaze decalate cu 90° electrice nu permite același mod de simetrie în fazele secundare. Pentru acest motiv, puterea aparentă a secundarului este cu aproape 4% mai mare decît în cazul conexiunii hexafaze în furcă.

Modul de funcționare al schemei. Conexiunea dublu-hexafază din fig. 219 se compune deci din două sisteme distincte, hexafaze în furcă, defazate între ele cu 90° electrice și avînd punctele lor neutre legate printr-un egalizor de fază cu două miezuri. În modul acesta totdeauna doi anozii, — cîte unul din fiecare grupă hexafază — poartă curentul redresat total al sistemului.

Valoarea curenților anodici. Fiecare anod poartă un curent $\frac{1}{2} I_d$ timp de

1,6 perioadă sau 60° electrice. Curentul anodic eficace este deci $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{6}} I_d$ față

de $\sqrt{\frac{1}{12}}$ din cazul conexiunii dodecafaze în furcă, deci cu 30% mai mic.

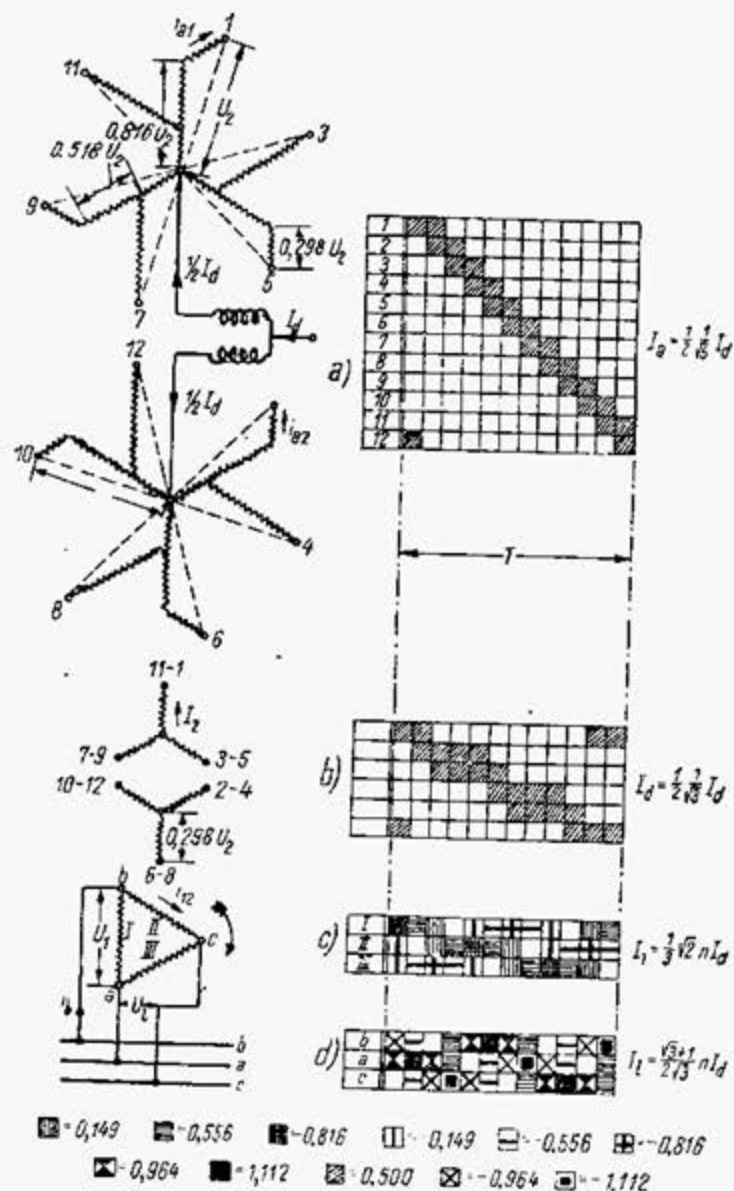


Fig. 219. - Conexiunea dublu-hexafazată:

a - schema de principiu a bobinajelor secundare inclusiv egalizoarele de fază și tabelele curenților anodici; b - bobinajele secundare interioare și tabela curenților secundari; c - schema bobinajelor primare și tabela curenților primari; d - linia de alimentare și curenții de linie.

Tensiunea secundară necesară. La această conexiune tensiunile de fază individuale U_2 se obțin prin combinația de fază a unor tensiuni cu valorile $0,298 U_2$ și $0,816 U_2$. Tensiunea de fază secundară este o tensiune care corespunde funcționării hexafazate cu $m = 6$, astfel încât valoarea sa eficace este:

$$U_2 = \frac{\pi}{6 \sqrt{2} \sin(\pi/6)} U_{d0} = 0,71 U_{d0}. \quad (115.1)$$

Distribuția curenților anodici. Distribuția curenților anodici este dată în fig. 219a, din care se obține valoarea eficace indicată mai sus:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (1)^2] \cdot \frac{1}{2} I_d} = 0,204 I_d. \quad (115.2)$$

Valoarea eficace a curenților secundari. Din cauza conexiunii în furcă a fiecărei grupe hexafazate, porțiunile interioare ale bobinajelor secundare se utilizează de două ori mai mult decât porțiunile exterioare care poartă curentul anodic. Aceasta se vede din distribuția curenților secundar dat în fig. 219b, din care se obține:

$$I_2 = I_a = \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (1)^2 + (1)^2 + (1)^2] \cdot \frac{1}{2} I_d} = 0,298 I_d. \quad (115.3)$$

Distribuția curenților primari. Distribuția corespunzătoare a curenților primari este arătată în fig. 219c și se obține în același mod, considerând curenții din diferitele faze primare, corespunzători curenților anodici și secundari, ținând seama nu numai de semnul lor, ci și de raportul curenților din diferitele părți ale bobinajului secundar, de exemplu, în timpul porțiunii de perioadă în care anozii 6 și 7 poartă simultan curentul total redresat I_d .

Valoarea instantanee a curenților primari. Curenții primari instantanei sînt:

$$i_{11} = - \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = - 0,816 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (115.4)$$

$$i_{12} = \left(\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,149 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (115.5)$$

$$i_{13} = \left(\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{6}} \right) I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,149 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (115.6)$$

Valoarea eficace a curenților primari. Din fig. 219c, se vede că valoarea eficace a curenților primari este deci:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{12} [(0,816)^2 + (0,556)^2 + (0,149)^2 + (-0,149)^2 + (-0,556)^2 + (-0,816)^2 + (-0,556)^2 + (-0,149)^2 + (0,149)^2 + (0,556)^2] \cdot I_d \frac{U_2}{U_1}} \quad (115.7)$$

$$= \frac{1}{3} \sqrt{2} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,171 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (115.8)$$

Distribuția curenților de linie. Distribuția curenților de linie dată în fig. 219d se obține în modul obișnuit din relațiile:

$$i_a = i_{11} - i_{13}; \quad i_b = i_{12} - i_{11}; \quad i_c = i_{13} - i_{12}. \quad (115.9)$$

este: Valoarea eficace a curenților de linie. Valoarea eficace a curenților de linie este:

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{12} [(0,964)^2 + (-0,556)^2 + (+0,556)^2 + (+0,964)^2 + (-1,112)^2 + (+1,112)^2 + (-0,964)^2 + (+0,556)^2 + (-0,556)^2 + (-0,964)^2 + (-1,112)^2] \cdot \frac{U_2}{U_1}} \quad (115.10)$$

$$= \frac{\sqrt{3} + 1}{2\sqrt{3}} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,787 I_d \frac{U_2}{U_1} \quad (115.11)$$

Puterea aparentă a secundarului. Din fig. 219a puterea aparentă a bobinajului secundar este:

$$P_2 = (12 \cdot 0,816 U_2 \cdot 0,204 I_d) + (6 \cdot 0,298 U_2 \cdot 0,289 I_d) = \quad (115.12)$$

$$= (2,000 + 0,518) \cdot U_2 I_d \quad (115.13)$$

$$= 1,86 P_d \quad (115.14)$$

Puterea aparentă a primarului. Din fig. 219c, puterea aparentă a bobinajului primar este:

$$P_1 = 3 U_1 I_L = 3 U_1 \cdot 0,787 I_d \frac{U_2}{U_1} = \quad (115.15)$$

$$= 1,05 P_d \quad (115.16)$$

Puterea aparentă absorbită de la rețea. Din fig. 219d, puterea aparentă absorbită este:

$$P_L = \sqrt{3} U_L I_L = \sqrt{3} U_L \cdot 0,787 I_d \frac{U_2}{U_1} = 1,01 P_d \quad (115.17)$$

Puterea aparentă a egalizorului. Egalizorul de fază este identic cu cele trei egalizoare de fază C din fig. 217a, utilizate în conexiuni cvadrot trifazate și puterea sa aparentă echivalentă este:

$$2 \cdot \frac{1}{6} \cdot \frac{U_{d0}}{16} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{1}{96} P_d \quad (115.18)$$

Comparație cu alte conexiuni. Puterea aparentă medie a transformatorului în ansamblu este deci 1,455 P_d pentru conexiunea dublu-hexafazată în comparație cu 1,625 P_d și 1,42 P_d pentru conexiuni dodecafazate și hexafazate în furcă, respectiv. În funcționarea dublu-hexafazată factorul de utilizare al transformatorului are o valoare intermediară între cazul funcționării hexafazate simple și funcționarea dodecafazată. În comparație cu cele două circuite egalizoare de fază anterioare având caracter dodecafazat, factorul de utilizare din acest caz nu este chiar atât de bun. În realitate, conexiunea dublu-hexafazată prezintă un factor de utilizare de 2,5% mai mic decât circuitul cvadrot trifazat, iar față de circuitul triplu-cvadrot trifazat, reducerea factorului de utilizare este de 7,5%. Pe de altă parte, trebuie menționat că este necesar numai un singur egalizor de fază cu două miezuri și deoarece acesta lucrează cu o armonică de frecvență 6f, creșterea bruscă a tensiunii care are loc la funcționarea în gol este de numai 3,5%, ceea ce reprezintă o caracteristică acceptabilă în practică. În cazul celorlalte două circuite

egalizoare de fază, creșterea de tensiune este de 20% sau 10%, astfel încât sînt necesare mijloace speciale pentru a furniza excitația cu armonici a egalizorului de fază.

Nici aici suma algebrică a curenților de fază primari în orice moment nu este nulă, după cum se poate vedea din fig. 219. Deci în această conexiune nu se poate utiliza un bobinaj primar legat în stea. Din acest motiv, de asemenea nici valoarea eficace a curenților de linie nu este egală cu $\sqrt{3}$ ori valoarea curenților primari.

116. Conexiunea dodecafazată, serie. Schema conexiunii. O altă conexiune, care ca și precedentele, utilizează conexiunea în furcă a transformatorului și funcționează pe principiul egalizării de fază, fără însă să cuprindă un dispozitiv propriu-zis de egalizare a fazelor, este conexiunea dodecafazată a lui Krämer, care se cunoaște în general sub numele de conexiunea serie. Această conexiune se poate spune că are proprietăți excelente; ea realizează condițiile cerute unei funcționări dodecafazate adică un reglaj de tensiune mai bun, o ondulație a tensiunii redresate practic nulă, un factor de putere bun și un randament mare. Modul special de funcționare al acestei conexiuni elimină avantajul unui factor de utilizare mic caracteristic conexiunilor simple dodecafazate, cum și inconvenientul unui consum important de putere în dispozitivul egalizor de fază.

Această interesantă conexiune dodecafazată, arătată în fig. 220 cuprinde în fond două transformatoare hexafazate în furcă a căror bobinaje primare sînt legate în serie astfel, încît fluxurile celor două transformatoare sînt defazate cu $\frac{\pi}{6}$ și bobinajele secun-

dare sînt legate în paralel prin legarea directă a punctelor lor neutre la borna negativă a sistemului redresor. În acest mod, cele două sisteme hexafazate se combină pentru a forma un sistem rigid dodecafazat care este simetric și stabil la toate sarcinile.

Modul de funcționare al conexiunii. Se vede din fig. 220 că decalajul de fază necesar între cele două sisteme hexafazate se obține legînd bobinajul primar al transformatorului A în stea și al transformatorului B în triunghi. Cele două transformatoare cu miezul cu trei coloane se dispun de obicei unul deasupra celuilalt

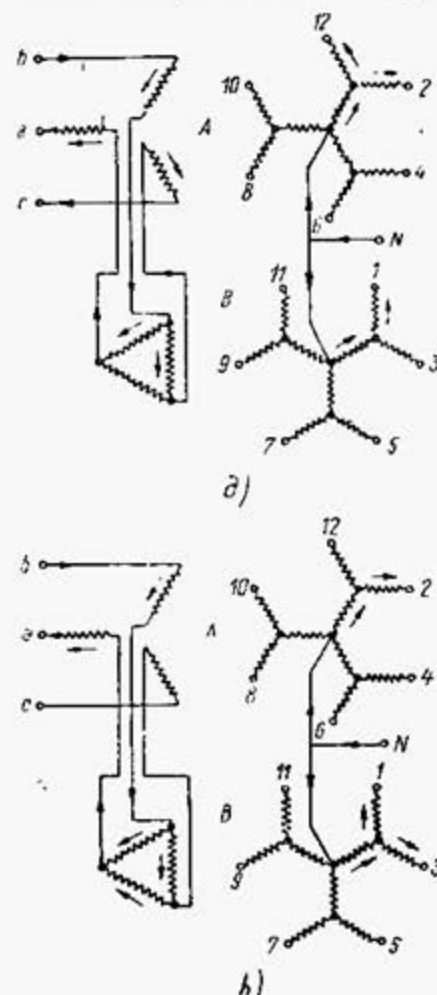


Fig. 220. — Conexiunea dodecafazată serie: a—distribuția curenților anodici; b—distribuția curenților după o perioadă de conducție de 30° față de situația din a.

sau unul lângă altul în același recipient. În virtutea conexiunii serie a bobinajelor primare, sarcina redresorului se împarte în mod egal între cele două grupe hexafazate și, din cauza conexiunii în furcă a bobinajului secundar, curentul de sarcină se distribuie totdeauna pe trei anodi simultan. Cu alte cuvinte, puterea aparentă totală în secundar este aceea care corespunde unei conexiuni cvadrofazate și în consecință fiecare anod poartă curentul un sfert de perioadă, adică 90° electrice. Datorită acestei egalizări de fază mari, puterea aparentă a ansamblului conexiunii, este foarte mult micșorată față de majoritatea conexiunilor dodecafazate și este de fapt cu 5 % mai mică decât în cazul conexiunii echivalente hexafazate în furcă.

Distribuția curentului de sarcină pe cei trei anodi cu funcționare simultană, nu este uniformă deoarece numărul spirelor pe o fază primară nu este același pentru ambele transformatoare. De fapt numărul spirelor în bobinajele primare A și B se află în raportul $1/\sqrt{3}$, astfel încât curenții anodici produși de curgerea curentului în fazele primare A și B trebuie să fie în raportul $\sqrt{3}/1$. Astfel curentul de sarcină se împarte între cei trei anodi în raportul $1/(2 + \sqrt{3})$, $\sqrt{3}/(2 + \sqrt{3})$ și $1/(2 + \sqrt{3})$. curenții anodici individuali au prin urmare o formă de undă în trepte. În timpul primelor 30° electrice din perioada de conducție, fiecare anod poartă un curent $I_d/(2 + \sqrt{3})$. În timpul perioadei de mijloc de 30° electrice, curentul are valoarea $\sqrt{3} I_d/(2 + \sqrt{3})$, pe când în perioada finală de 30° curentul purtat de primul anod revine la valoarea $I_d/(2 + \sqrt{3})$. Distribuția curentului de sarcină în perioada de 30° în care anozii 1, 2 și 3 conduc împreună, este arătată în fig. 220a. Se arată de asemenea curenții primari corespunzători și se vede că curentul este absorbit de la conductorul b și restituit prin conductoarele a și c. În timpul următoarei perioade de 30° , când curentul de sarcină este purtat simultan de anozii 1, 2 și 3, condițiile pe partea primară a transformatorului se modifică și curentul este absorbit de la conductorul b și restituit prin conductorul a, pe când conductorul c nu dă și nu primește curent, așa cum se arată în fig. 220b. Din diagramele date, se mai vede că, în mod alternativ, două sau trei din fazele primare poartă curentul și că, atunci când transformatorul A are două din bobinajele sale de fază primară încărcate, toate cele trei faze primare ale transformatorului B poartă curentul, și viceversa. În acest mod prin urmare, cu toată funcționarea ciudată a ansamblului transformatorului, se reușește să se obțină simetria necesară celor două sisteme de curenți de fază primari. Ca rezultat al acestei simetrii, fiecare transformator poartă exact jumătate din sarcina totală a sistemului redresor.

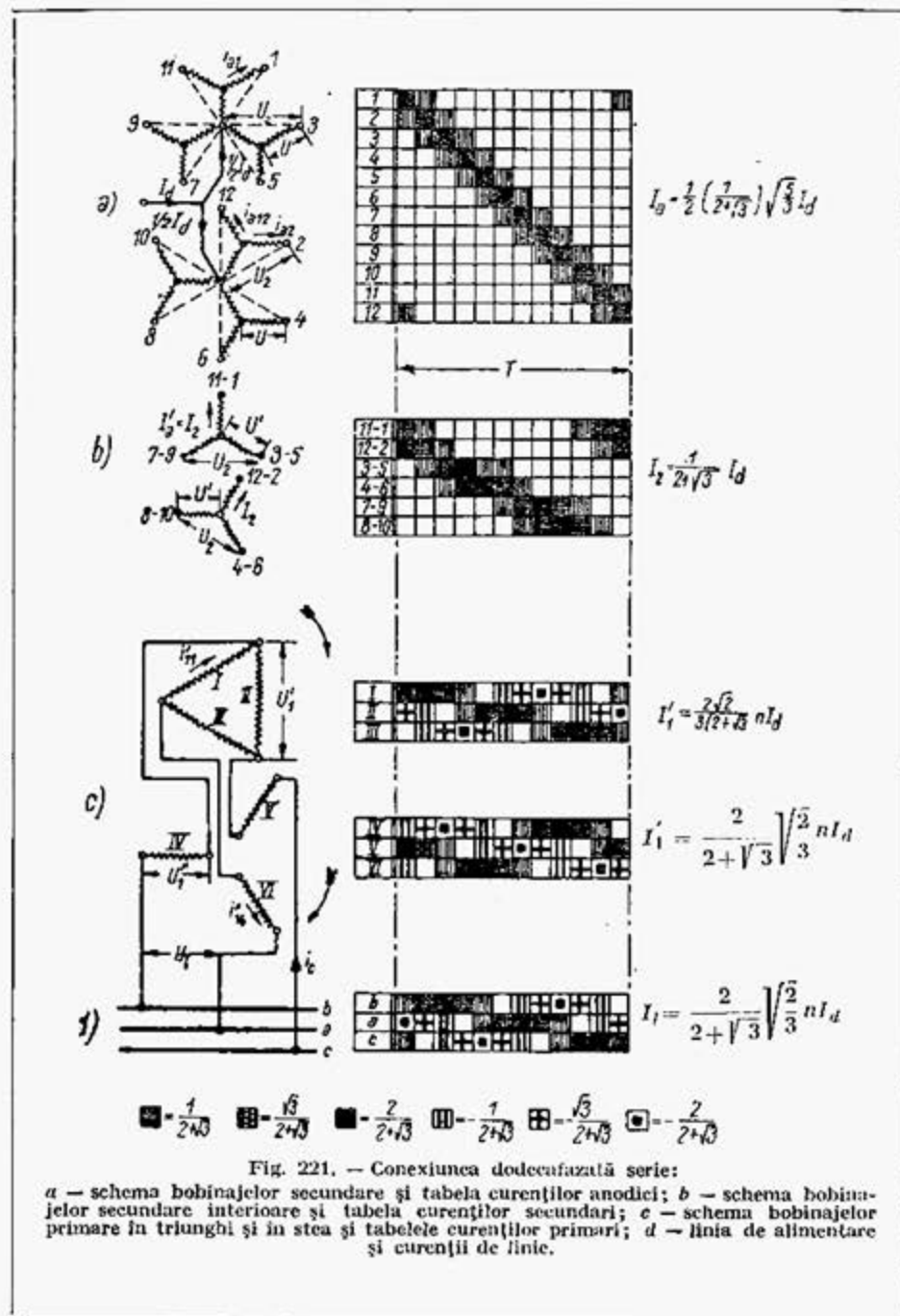
Tensiunea secundară necesară. Deoarece circuitul serie dodecafazat funcționează în modul descris mai sus ca un sistem cvadrofazat cu $m = 1$, tensiunea secundară de fază are o valoare efecă:

$$U_2 = \frac{\pi}{4\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{d0}}{\sin(\pi/1)} = 0,785 U_{d0}. \quad (116.1)$$

Distribuția și valoarea efecă a curenților anodici. Distribuția curentului anodic este arătată în mod schematic în fig. 221a și este obținută din distribuția curentului de sarcină discutată mai sus în legătură cu fig. 220. Se vede din diagramă că valoarea efecă a curentului anodic este:

$$I_a = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{1}{12} [(1)^2 + (\sqrt{3})^2 + (1)^2]} \cdot I_d = \frac{I_d}{2 + \sqrt{3}} \sqrt{\frac{5}{12}} = 0,173 I_d. \quad (116.2)$$

Valoarea efecă a curenților secundari. Din cauza conexiunii în furcă a fiecărui bobinaj secundar hexafazat, porțiunile interioare ale bobinajului se utilizează de



două ori mai mult decât porțiunile exterioare care poartă curenții anodici. Aceasta se vede din distribuția reprezentată în diagrama din fig. 221b, din care se poate deduce valoarea eficace a curentului secundar:

$$I_2 = I_a' = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{12} [(\sqrt{3})^2 + (1)^2 + (1)^2 + (\sqrt{3})^2 + (2)^2]} \cdot I_d =$$

$$= \frac{I_d}{2 + \sqrt{3}} = 0,268 I_d. \quad (116.3)$$

Distribuția curenților secundari. În diagrama din fig. 221c, este reprezentată distribuția curentului primar corespunzător, care se obține direct din însumarea curenților anodici și secundar dați în diagramele a și b, ținând seamă de semnul lor determinat de succesiunea fazelor și de sensul de curgere a curentului în diferitele faze. Folosind notațiile date în diagramă, se poate scrie:

$$\begin{aligned} i_{11} &= (1) + (3) - (7 - 9); & i_{14} &= (8 - 10) - (2) - (4); \\ i_{12} &= (5) + (7) - (11 - 1); & i_{15} &= (12 - 2) - (6) - (8); \\ i_{13} &= (9) + (11) - (3 - 5); & i_{16} &= (4 - 6) - (10) - (12). \end{aligned}$$

Neglijând pentru moment raportul dintre curenții primari și secundari și luând în considerare de exemplu perioada de 30° a tensiunii secundare în timpul căreia anozii 12, 1 și 2 poartă împreună curentul de sarcină I_d se obține pentru curenții instantanei în cele două bobinaje primare:

$$i_{11} = (1) = \frac{\sqrt{3} I_d}{2 + \sqrt{3}} \quad (116.4)$$

$$i_{12} = - (11 - 1) = - \frac{\sqrt{3} I_d}{2 + \sqrt{3}} \quad (116.5)$$

$$i_{13} = 0 \quad (116.6)$$

$$i_{14} = - (2) = - \frac{I_d}{2 + \sqrt{3}} \quad (116.7)$$

$$i_{15} = (12 - 2) = \frac{2 I_d}{2 + \sqrt{3}} \quad (116.8)$$

$$i_{16} = - (12) = - \frac{I_d}{2 + \sqrt{3}} \quad (116.9)$$

Aceste valori sînt arătate în diagrama de distribuție din fig. 221c. Ele sînt însă numai valori echivalente raportate la bobinajul secundar și trebuie corectate pentru a ține seamă de raportul de transformare al transformatoarelor înainte de a găsi valorile eficace reale.

În cazul unui primar legat în triunghi, raportul dintre curenții primari și secundar este $\frac{U}{U_1} = \frac{U'}{U_1} = \frac{U_2}{\sqrt{3} U_1}$, pe cînd în cazul unui primar legat în stea, raportul de

transformare este $\frac{U}{U_1} = \frac{U}{U_1} = \frac{U_2}{\sqrt{3} U_1}$. Pe de altă parte, deoarece fiecare transformator poartă jumătate din curentul de sarcină al redresorului, tensiunea de linie se împarte în mod egal pe cele două primare care sînt în serie; în modul acesta avem $U_1' = \frac{1}{2} \frac{U_1}{\sqrt{3}}$ și $U_1' = \frac{U_1}{2}$ sau, notînd cu U_1 tensiunea de fază a rețelei de alimentare:

$$U_1' = \frac{1}{2} U_1 \text{ și } U_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} U_1.$$

În consecință, pentru fazele I, II și III, raportul curenților primari și secundari este $2U_2/3U_1$, pe cînd pentru fazele IV, V și VI, este $2U_2/\sqrt{3} U_1$. Curentul din primarul legat în stea este astfel de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât curentul din primarul legat în triunghi, ceea ce este evident prin faptul că există o simetrie în conexiunea în furcă.

Valoarea eficace a curentului I_1' . Din fig. 221 c, se obține valoarea eficace a curentului din primarul legat în triunghi:

$$I_1' = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{12} [(\sqrt{3})^2 + (2)^2 + (\sqrt{3})^2 + (1)^2 + (-1)^2 +$$

$$+ (- \sqrt{3})^2 + (-2)^2 + (- \sqrt{3})^2 + (-1)^2 + (1)^2]} \cdot I_d \frac{2U_2}{3U_1} = \quad (116.10)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{3(2 + \sqrt{3})} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,253 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (116.11)$$

Valoarea eficace a curentului I_1'' . Valoarea eficace a curentului din primarul legat în stea este:

$$I_1'' = \frac{1}{2 + \sqrt{3}} \sqrt{\frac{1}{12} [(-1)^2 + (- \sqrt{3})^2 + (-2)^2 + (- \sqrt{3})^2 + (-1)^2 +$$

$$+ (1)^2 + (\sqrt{3})^2 + (2)^2 + (\sqrt{3})^2 + (1)^2]} \cdot I_d \frac{2U_2}{\sqrt{3} U_1} = \quad (116.12)$$

$$= \frac{2}{2 + \sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{U_2}{U_1} = 0,438 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (116.13)$$

În fig. 221 d este arătată distribuția curentului de linie care este evident aceeași ca a curenților din primarul legat în stea, astfel încît valoarea eficace a curentului de linie este:

$$I_l = 0,438 I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} = 0,759 I_d \frac{U_2}{U_1}. \quad (116.14)$$

Puterea aparentă a secundarului. Din figurile 221, *a* și *b*, se obține puterea aparentă totală a bobinajelor secundare

$$P_2 = 12 U I_a + 6 U' I_a = \quad (116.15)$$

$$= \left[12 \cdot \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2 + \sqrt{3}} \right) \sqrt{\frac{5}{3}} I_d \right] + \left[6 \cdot \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_d}{2 + \sqrt{3}} \right] = \quad (116.16)$$

$$= \frac{2\sqrt{3}}{2 + \sqrt{3}} \left(\sqrt{\frac{5}{3}} + 1 \right) U_2 I_d = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{5} + 1}{2 + \sqrt{3}} \right) U'_{d0} I_d = 1,67 P_d. \quad (116.17)$$

Puterea aparentă a primarului. În mod analog, din fig. 221 *c* se obține puterea aparentă totală a bobinajelor primare:

$$P_1 = 3 U'_1 I'_1 + 3 U''_1 I''_1 = \quad (116.18)$$

$$= \left[3 \cdot \frac{\sqrt{3} U_1}{2} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{3(2 + \sqrt{3})} I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} \right] + \left[3 \cdot \frac{U_1}{2} \cdot \frac{2}{2 + \sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \cdot \frac{U_2}{U_1} \right] =$$

$$= \frac{2\sqrt{6}}{2 + \sqrt{3}} U_2 I_d = \quad (116.19)$$

$$= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{6}}{2 + \sqrt{3}} \cdot U'_{d0} \cdot I_d = 1,03 P_d. \quad (116.20)$$

Puterea absorbită de la rețea. Din fig. 221 *d*, se obține puterea aparentă absorbită de la rețea:

$$P_l = \sqrt{3} U_l I_l = \sqrt{3} U_l \frac{2\sqrt{2}}{2 + \sqrt{3}} I_d \frac{U_2}{U_l} = \frac{2\sqrt{6}}{2 + \sqrt{3}} U_2 I_d = 1,32 P_d. \quad (116.21)$$

Comparație cu alte conexiuni. Puterea aparentă medie a întregului transformator este deci de numai 1,35 P_d , o valoare care reprezintă o ameliorare importantă față de valorile obținute la toate celelalte sisteme dodecafazate, cu excepția circuitului triplu-cvadrofazat. Circuitul serie dodecafazat are avantajul față de precedentul că nu necesită un egalizor de fază. În același timp, deși gradul de egalizare al fazelor este același pentru ambele conexiuni, valoarea eficace a curentului anodic la circuitul serie nu este tot atât de bună, ea fiind 0,173 I_d față de 0,167 I_d , deci o creștere de 3,5%. Totuși, circuitul serie are marele avantaj al unei simplități relative în construcția transformatorului în ansamblu, care se poate compara numai cu simplitatea întâlnită în cazul sistemului de redresare dublu-trifazat.

J. Redresoare polifazate cu tensiune reglabilă

117. Metode de reglare a tensiunii. Se folosesc următoarele metode de reglare a tensiunii unui redresor polifazat:

- Reglarea tensiunii pe partea de curent alternativ.
- Reglarea tensiunii prin variația parametrilor elementelor redresoare.

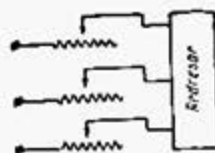


Fig. 222. — Reglarea tensiunii redresate cu ajutorul unui reostat montat în circuitul primar al redresorului.



Fig. 223. — Reglarea tensiunii redresate cu ajutorul unor inductanțe montate în circuitul primar al redresorului.

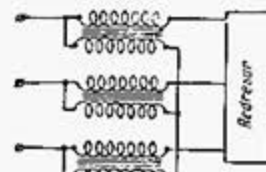


Fig. 224. — Schema principală a unui regulator de inducție.

α) Reglarea tensiunii pe partea de curent alternativ. În cazul puterilor mici, se poate face reglarea tensiunii prin trei reostate introduse în serie cu bobinajele primare ale transformatorului ca în fig. 222.

Mai economică este reglarea prin inductanțe variabile, ca în fig. 223; în acest caz, se evită consumul de putere reală al reostatelor, dar se introduce un consum de putere reactivă.

Mai avantajoasă este reglarea de tensiune printr-un regulator de inducție, ca în fig. 224, care permite un reglaj foarte fin al tensiunii redresate.

Un alt mod de reglare este arătat în fig. 225. Circuitul reprezintă un redresor hexafazat cu elemente redresoare uscate. În serie cu fiecare element redresor se află un transductor (bobină cu miez saturat cu o înfășurare de curent alternativ și o înfășurare de comandă de curent continuu) care prezintă o impedanță variabilă în curent alternativ, după mărimea curentului continuu de saturație. Ansamblul transductor + element redresor are o funcționare similară cu a unui tub redresor cu grilă de comandă.



Fig. 225. — Folosirea transductorilor pentru reglarea tensiunii redresate.

β) Reglarea tensiunii prin variația parametrilor elementelor redresoare. Utilizarea mutatoarelor mono- sau poli-anodice cu grilă de comandă permite reglarea tensiunii redresate. În mod continuu, fără inerție și suficient de precis, fără ca să se consume o putere reală sau reactivă în procesul de reglaj.

Reglarea prin comandă pe grilă intensifică regimul deformant și produce scăderea factorului de putere al redresorului.

Din aceste motive, reglarea prin grile comandate nu se întrebuintează pentru intervale de reglaj mai mici decât 10–20 %. Dacă pulsația tensiunii redresate nu este admisibilă (cazul emițătoarelor radio), intervalul se micșorează la 5–8 %, pentru ca filtrul de netezire să nu devină prea voluminos și costisitor.

Metodele și circuitele de comandă ale mutatoarelor cu grilă de comandă se află descrise la § 25, 36 și 42–47.

118. Mărimi fundamentale ale redresorului comandat pe grilă. Tensiunea medie redresată (cazul $\gamma = 0$). Dacă se consideră un transformator ideal (cu impedanță

de scurt circuit nulă) și dacă se neglijează căderea de tensiune pe arc, tensiunea la bornele redresorului, adică între catod și punctul neutru al transformatorului, are forma din fig. 226.

Media acestei tensiuni este:

$$U'_{d0\alpha} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)}^{\left(\frac{\pi}{m}+\alpha\right)} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t d(\omega t) = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha. \quad (118.1)$$

În care: U_2 este valoarea eficace a tensiunii de fază secundare;

α — unghiul de comandă; relația dintre acest unghi și unghiul propriu-zis de aprindere al anodului este $\alpha_a = \alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$.

Comanda pe grilă are efect numai pentru $\alpha_a > \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}$ sau $\alpha > 0$.

Cu relația (73.3), relația (118.1) se mai poate scrie:

$$U'_{d0\alpha} = U'_{d0} \cos \alpha, \quad (118.2)$$

În care U'_{d0} este tensiunea medie redresată, în aceleași condiții ca mai sus, dar fără comandă pe grilă ($\alpha = 0$).

Dacă sarcina redresorului este pur rezistivă, adică lipsește reactorul de netezire, relațiile (118.1) sau (118.2) nu sînt valabile decît pînă la un unghi limită:

$$\alpha_{\text{lim}} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}. \quad (118.3)$$

Pentru $\alpha \leq \alpha_{\text{lim}}$, curentul redresat i_d în sarcină, este neîntrerupt deoarece conducția pe un anod nu încetează decît în momentul cînd anodul următor, primind impulsul de comandă la unghiul α_a , începe să conducă.

Pentru $\alpha > \alpha_{\text{lim}}$, se vede în fig. 226,

că la $\omega t_1 = \frac{\pi}{2}$ anodul care conducea se

stinge, deoarece tensiunea sa de alimentare se anulează, iar anodul următor nu poate încă conduce, fiindcă n-a primit impulsul de comandă, astfel curentul i_d este întrerupt.

De la $\omega t_1 = \frac{\pi}{2}$ și pînă la $\omega t_2 = \frac{\pi}{m} + \alpha > \frac{\pi}{2}$ curentul i_d este nul.

În acest caz, tensiunea medie redresată este:

$$U'_{d0\alpha} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t d(\omega t) = \frac{m}{2\pi} \sqrt{2} U_2 \left[1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right]. \quad (118.4)$$

Valorile unghiului limită α_{lim} . Cu relația (118.3) se calculează valorile unghiului limită de aprindere, peste care rezultă un regim de curent redresat întrerupt în cazul unei sarcini pur rezistive. Tabela 14 arată aceste valori pentru sistemele polifazate obișnuite.

Adîncimea reglajului (K_α) (cazul $\gamma = 0$). Adîncimea reglajului tensiunii redresate se definește prin raportul $U'_{d0\alpha} / U'_{d0}$.

În cazul regimului de curent neîntrerupt, într-o sarcină rezistivă din (118.2) se obține:

$$K_\alpha = \cos \alpha. \quad (118.5)$$

În cazul regimului de curent întrerupt, din (118.4) și (73.3), se obține:

$$K_\alpha = \frac{1 - \sin \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right)}{2 \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (118.6)$$

Cînd $\alpha = \alpha_{\text{lim}}$, relațiile (118.5) și (118.6) dau, evident, aceeași valoare:

$$K_{\alpha \text{ lim}} = \sin \frac{\pi}{m}. \quad (118.7)$$

În fig. 227, s-a reprezentat variația adîncimii reglajului K_α , în funcție de unghiul de comandă α , pentru diferite numere de fază. Se

vede că pentru $m = \infty$, deoarece $\alpha_{\text{lim}} = \frac{\pi}{2}$, variația lui K_α este reprezentată

de o cosinusoidă conform cu (118.5); pentru diferite valori m , variația lui K_α deviază de la acest caz limită, începînd de la punctul corespunzător abscisei α_{lim} , dată de relația (118.3) sau tabela 14 și ordonatei $K_{\alpha \text{ lim}}$ dată de relația (118.7). Curba limită ($m = \infty$) este valabilă și pentru cazul m oarecare dacă în circuitul de sarcină există un reactor de inductanță teoretic infinită.

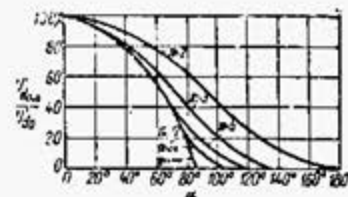


Fig. 227. — Variația factorului de redresare la un redresor polifazat comandat pe grilă (fără considerarea fenomenului de comutație).

Tabela 14. Variația unghiului de aprindere limită al regimului de curent neîntrerupt în sarcină rezistivă

m	2	3	4	6	12
α_{lim}	0°	30°	45°	60°	75°

Valoarea eficace a tensiunii redresate. (cazul $\gamma = 0$). În cazul regimului de curent neîntrerupt într-o sarcină rezistivă, analog cu (118.1) se obține:

$$U'_{d0\alpha \text{ eficace}} = \sqrt{\frac{m}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)}^{\left(\frac{\pi}{m}+\alpha\right)} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t)^2 d(\omega t)} = \sqrt{2} U_2 \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\alpha}. \quad (118.8)$$

În cazul regimului de curent întrerupt, analog cu (118.4) se obține:

$$U'_{d0\alpha} \text{ eficace} = \left[\frac{m}{2\pi} \int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)}^{\frac{\pi}{2}} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t)^2 d(\omega t) - \left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right) \right] \quad (118.9)$$

$$= \sqrt{2} U_2 \left[\frac{1}{4} + \frac{m}{8\pi} \left[\pi - 2\alpha - \sin 2 \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right] \right].$$

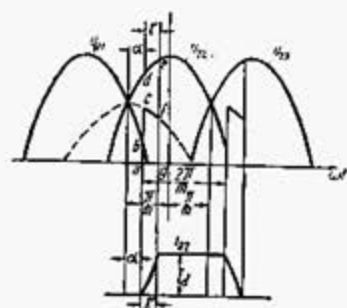


Fig. 228. — Forma de undă a tensiunii redresate la un redresor polifazat comandat pe grilă, cu considerarea fenomenului de comutație.

fi valoarea unghiului de comandă α , astfel încât fără nici o restricție, tensiunea medie redresată este:

$$U'_{d\alpha} = \frac{m}{2\pi} \left[\int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha-\gamma\right)}^{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)} u_d d(\omega t) + \int_{-\left(\frac{\pi}{m}-\alpha\right)}^{\frac{\pi}{m}+\alpha} u_{22} d(\omega t) \right]. \quad (118.10)$$

Dacă în această expresie, se introduce:

$$u_{22} = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \quad (118.11)$$

și:

$$u_d = \frac{u_{21} + u_{22}}{2} = \sqrt{2} U_2 \cos \frac{\pi}{m} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right), \quad (118.12)$$

se obține:

$$U'_{d\alpha} = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \left[\frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2} \right], \quad (118.13)$$

sau:

$$U'_{d\alpha} = U'_{d0} \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2}. \quad (118.14)$$

Adâncimea reglajului $K_{\alpha\gamma}$ (cazul $\gamma \neq 0$). Adâncimea reglajului tensiunii redresate se definește aici prin raportul $U'_{d\alpha}/U'_{d0}$ și are expresia:

$$K_{\alpha\gamma} = \frac{\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)}{2}. \quad (118.15)$$

În fig. 229a, s-a reprezentat variația factorului $K_{\alpha\gamma}$ cu unghiul de comandă α pentru diferite unghiuri de comutație.

Influența unghiului de comandă asupra caracteristicii externe a redresorului. Există o relație bine definită între unghiul de comandă α și unghiul de comutație γ . În cazul unui transformator cu reactanță de scăpări, dar cu rezistență și curent de magnetizare neglijabile, această relație este:

$$\cos (\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{I_d X_2}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}. \quad (118.16)$$

Când $\alpha_a = 0$, relația (118.16) coincide cu (91.14) stabilită la redresorul fără comandă pe grilă.

În fig. 229b, s-a reprezentat variația unghiului de comutație γ în funcție de unghiul de comandă α , pentru diferite valori ale parametrului $\frac{I_d X_2}{\sqrt{2} U_2}$ și în cazul $m=3$. Se vede

că unghiul de comutație scade când unghiul de comandă crește. Cu toate acestea, căderea de tensiune produsă de reactanța de scăpări X_2 la un curent I_d dat este aceeași ca la redresorul fără comandă pe grilă. În adevăr, înlocuind relația (118.16) în (118.14) se obține:

$$U'_{d\alpha} = U'_{d0} \cos \alpha - \frac{m}{\pi} \frac{I_d X_2}{2} = U'_{d0\alpha} - \frac{m}{\pi} \frac{I_d X_2}{2}. \quad (118.17)$$

Dacă se compară expresia (118.17) cu (92.8) se vede că, în ce privește caracteristica externă a redresorului $U'_d = f(I_d)$, unghiul de comandă nu face altceva decât să micșoreze valoarea inițială a tensiunii medii redresate de la U'_{d0} la $U'_{d0\alpha}$, iar panta caracteristicii rămâne neschimbată $\left(\frac{1}{2} \frac{m}{\pi} X_2 \right)$.

Forma curentului redresat în regim întrerupt (sarcina $R_s - L$). Când sarcina redresorului este pur rezistivă, forma curentului anodic este proporțională cu forma tensiunii redresate. Dacă însă în serie cu rezistența de sarcină există un reactor de inductanță finită, forma curentului trebuie obținută scriind ecuația diferențială a circuitului.

În fig. 230 este reprezentat cazul regimului întrerupt când există inductanță în circuitul de sarcină. Datorită tensiunii induse de inductanță conducția pe un

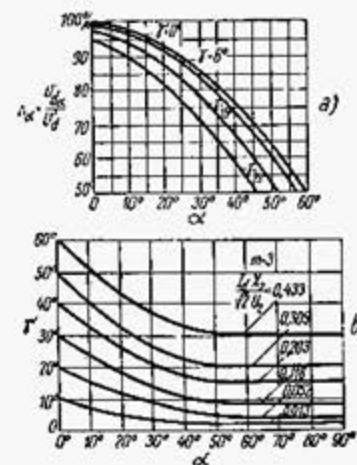


Fig. 229. — Variația factorului de redresare și a unghiului de comutație în funcție de unghiul de comandă la un redresor polifazat cu considerarea fenomenului de comutație:
a — variația adâncimii reglajului $K_{\alpha\gamma}$;
b — variația unghiului de comutație.

anod se prelungește și la valori negative ale tensiunii de alimentare. Tensiunea redresată are forma hașurată în figură.

Introducând o variabilă auxiliară $y = \omega t - \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} - \alpha - \frac{\alpha_c}{2}$, ecuația diferențială a circuitului este:

$$\sqrt{2} U_2 \cos \left(y - \frac{\pi}{m} + \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \right) = R_s i_d + \omega L \frac{di_d}{dy} \quad (118.18)$$

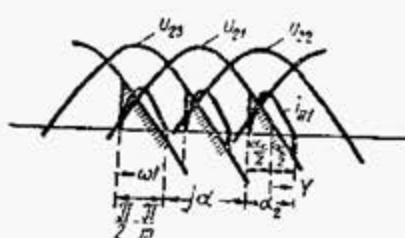


Fig. 230. — Forma de undă a tensiunii redresate și a curentului redresat, în regim întrerupt.



Fig. 231. — Forma de undă a curentului redresat în regim întrerupt, la un redresor hexafazat cu reactor de netezire ($\frac{\omega L}{R_s} = 0,25$) la diferite unghiuri de comandă.

diferite valori α , care produc un regim de curent întrerupt. Se vede că la $\alpha = 180^\circ$, curentul redresat nu mai apare deloc.

Condiția regimului de curent întrerupt. Curentul i_d se anulează la $y = \frac{\alpha_c}{2}$. Pe de altă parte, pentru ca regimul să fie întrerupt, trebuie ca $\alpha_c \leq \frac{2\pi}{m}$. Pentru a găsi unghiul de conducție, se introduce în (118.20) valoarea

$y = \frac{\alpha_c}{2}$ și se obține:

$$\cos \varphi \cos \left(\alpha_c - \frac{\pi}{m} + \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \right) = \cos \varphi \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{m} - \varphi \right) e^{-\frac{\alpha_c}{2} \operatorname{ctg} \varphi} = 0. \quad (118.21)$$

în care: α_c este unghiul de conducție;
 α — unghiul de comandă;
 R_s — rezistența de sarcină;
 ωL — reactanța reactorului de netezire.

Condiția inițială pentru curentul i_d fiind:
 $[i_d]_{y=-\frac{\alpha_c}{2}} = 0, \quad (118.19)$

soluția ecuației (118.18) este:

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \left[\cos \varphi \cos \left(y - \frac{\pi}{m} + \alpha + \frac{\alpha_c}{2} - \varphi \right) - \cos \varphi \times \right. \quad (118.20)$$

$$\left. \times \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{m} - \varphi \right) e^{-\left(y + \frac{\alpha_c}{2} \right) \operatorname{ctg} \varphi} \right]$$

în care $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R_s}$.

În fig. 231 s-au trasat pentru cazul $\frac{\omega L}{R_s} = 0,25$ formele curentului i_d pentru

Rezolvînd această ecuație în raport cu α , rezultă:

$$\alpha = \frac{\pi}{m} - \frac{\alpha_c}{2} + \varphi + \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{th} \left(\frac{\alpha_c}{2} \operatorname{ctg} \varphi \right)}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2}}. \quad (118.22)$$

Această relație permite să se calculeze α în funcție de α_c sau invers.

Unghiul de comandă limită se obține intro-

ducînd în (118.22) valoarea $\alpha_c = \frac{2\pi}{m}$:

$$\alpha_{\text{lim}} = \varphi + \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{th} \left(\frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \varphi \right)}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{m}}. \quad (118.23)$$

În fig. 232 s-a reprezentat, pe baza relației (118.22), variația unghiului de conducție α_c în funcție de unghiul de aprindere: $\alpha_a = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha$, pentru diferite valori $\omega L/R_s$. Pe baza relației (118.23), s-au indicat în diagramă și limitele de la care începe regimul întrerupt.

Valoarea medie a curentului în regim întrerupt. Valoarea medie a curentului redresat se poate obține direct din ecuația (118.18), prin integrare, observînd că tensiunea medie pe reactor trebuie să fie nulă:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\alpha_c}{2}}^{+\frac{\alpha_c}{2}} \cos \left(y - \frac{\pi}{m} + \alpha + \frac{\alpha_c}{2} \right) dy =$$

$$= \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\alpha_c}{2} \cos \left(\alpha + \frac{\alpha_c}{2} - \frac{\pi}{m} \right). \quad (118.24)$$

La limită, $\alpha_c = \frac{2\pi}{m}$, expresia (118.24) devine:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = \frac{U_{d0}}{R_s} \cos \alpha. \quad (118.25)$$

Valoarea eficientă a curentului în regim întrerupt. Luînd media pătratică a curentului reprezentat de expresia (118.20), folosind relația (118.22) se obține:

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \sqrt{\cos^2 \varphi \left\{ \frac{m \alpha_c}{2} + \frac{m}{2\pi} \sin \alpha_c \left[\cos \left(2\alpha + \alpha_c - \frac{2\pi}{m} \right) - \sin \left(2\alpha + \alpha_c - \frac{2\pi}{m} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] \right\}}. \quad (118.26)$$

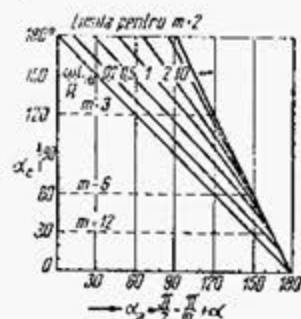


Fig. 232. — Unghiul de conducție al curentului redresat, în regim întrerupt, în funcție de unghiul de aprindere.

Cu ajutorul relațiilor (118.24) și (118.25) se poate calcula coeficientul de undulație al curentului redresat:

$$w_{I_d} = \frac{\sqrt{I_{dc}^2 - I_d^2}}{I_d} \quad (118.27)$$

Din dependența tensiunii medii redresate de unghiul de conducție α_c și din dependența unghiului α_c de $\frac{\omega L}{R_s}$ și deci de curentul mediu redresat, rezultă

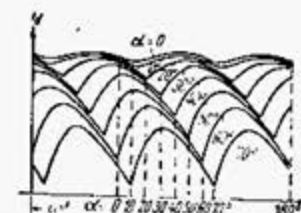


Fig. 233. - Forma de undă a curentului redresat. În regim neîntrerupt la un redresor hexafazat cu reactor de netezire ($\frac{\omega L}{R_s} = 0,25$) pentru diferite unghiuri de comandă.

o caracteristică externă a redresorului $I_d = f(I_d)$ care depinde de sarcina I_d chiar dacă se neglijează impedanța de scurtcircuit a transformatorului. Cu formulele date mai sus, se poate calcula această dependență.

Forma curentului redresat în regim neîntrerupt (sarcină $R_s = I_d$). Dacă unghiul de comandă scade sub valoarea dată de formula (118.23), curentul redresat devine neîntrerupt. Forma lui se poate găsi folosind tot ecuația (118.18), observând însă că de data aceasta

$$\alpha_c = \frac{2\pi}{m}, \quad y = \omega t - \frac{\pi}{2} - \alpha$$

$$\text{și că } [i_d]_y = -\frac{\pi}{m} - [i_d]_y = -\frac{\pi}{m}$$

(adică în virtutea periodicității curentului, el are aceeași valoare la începutul și sfârșitul perioadei de conducție). În aceste condiții, din integrarea ecuației (118.28) se obține:

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \left[\cos \varphi \cos (y + \alpha - \varphi) + \frac{\sin \frac{\pi}{m} \cos \varphi \sin (\varphi - \alpha)}{\operatorname{sh} \left(\frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \varphi \right)} e^{-y \operatorname{ctg} \varphi} \right] \quad (118.28)$$

În fig. 233 s-au reprezentat formele curentului redresat, pentru cazul $\frac{\omega L}{R_s} = 0,25$ și diferite valori α , care produc un regim de curent neîntrerupt.

Pentru valori mici $\frac{R_s}{\omega L}$ (adică reactor de netezire destul de mare), se poate da o expresie mai simplă pentru i_d , care se obține din (118.28):

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{R_s} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha + \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \left[\sin (y + \alpha) - \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} (\sin \alpha + y \cos \alpha) \right] \quad (118.29)$$

K. Regimul deformant în redresoarele polifazate

a) Armonici

119. Armonici la intrarea și ieșirea redresorului. Redresorul cu arc de mercur este în fond un întreruptor sau un dispozitiv de comutare; de aceea încărcarea pe care o exercită asupra rețelei de alimentare de curent alternativ este discontinuă.

Din acest punct de vedere el se deosebește fundamental de alte forme de sarcină electrică, ca de exemplu: transformatorul, motorul de inducție sau convertizoarele rotative, care toate absorb putere de la sursa de alimentare în mod neîntrerupt. Ca rezultat al încărcării discontinue a rețelei de curent alternativ, curentul absorbit de redresor nu mai este sinusoidal. Formele de undă și valorile instantanee ale curenților de linie în cazul diferitelor tipuri de circuite sau redresoare s-au tratat la § 102-116, unde s-a arătat în ce mod curenții pe partea de intrare a redresorului ascultă de anumite legi, care depind de felul sarcinii redresorului.

Din cauza discontinuităților în forma de undă a curenților secundari, curenții primari de fază și de linie sînt distorsionați față de forma de undă sinusoidală. Forma de undă rezultantă poate fi privită ca însumarea unei unde fundamentale sinusoidale, cu un număr de armonici de ordine diferite și de mărime și faze diferite.

Tensiunea de ieșire a unui redresor cu arc de mercur nu este perfect constantă, gradul de distorsiune față de forma rectilinie depinzînd de asemenea de felul sarcinii redresorului. Forma de undă a tensiunii redresate poate să fie reprezentată ca suprapunerea unei tensiuni continue de mărime constantă și a unei serii de tensiuni alternative armonice.

120. Armoniciile și factorul de undulație al tensiunii redresate. Redresorul necomandat pe grilă (cazul $\gamma = 0$). Dacă se neglijează impedanța de scurtcircuit a transformatorului și căderea de tensiune pe arc, tensiunea redresată are forma din fig. 178. Ea se compune din porțiuni din tensiunea de fază secundară a transformatorului:

$$u = \sqrt{2} U_2 \cos \omega t. \quad (120.1)$$

Expresia analitică a tensiunii redresate se obține dezvoltînd în serie Fourier funcția pară reprezentată în fig. 178:

$$u_{d0} = U_{d0} + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{(km)} \cos km \omega t. \quad (120.2)$$

Valoarea medie a tensiunii redresate, cum s-a arătat și la § 73 este:

$$U_{d0} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} U_2 \cos d(\omega t) = \sqrt{2} U_2 \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (120.3)$$

Amplitudinea armonicii de ordinul $n = km$ este:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} U_{(km)} &= \frac{m}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} U_2 \cos \omega t \cos km \omega t d(\omega t) = \\ &= -\frac{2m}{\pi} \sqrt{2} U_2 \cdot \frac{\cos k\pi \sin \frac{\pi}{m}}{(km)^2 - 1} = -\frac{2U_{d0}}{(km)^2 - 1} \cos k\pi. \end{aligned} \quad (120.4)$$

În sens absolut, amplitudinea armonicii a n -a are valoarea:

$$\left| \sqrt{2} U_{(km)} \right| = \frac{2U_{d0}}{(km)^2 - 1}. \quad (120.5)$$

Tensiunea redresată în cazul $m = 3$ se deduce din (120.2), (120.3) și (120.4):

$$u'_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_2 \left[1 + \frac{2}{2 \cdot 4} \cos 3\omega t - \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \frac{2}{8 \cdot 10} \cos 9\omega t - \frac{2}{11 \cdot 13} \cos 12\omega t + \dots \right] \quad (120.6)$$

Tensiunea redresată în cazul $m = 6$, se deduce la fel din (120.2), (120.3) și (120.4):

$$u'_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left[1 + \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \frac{2}{11 \cdot 13} \cos 12\omega t + \frac{2}{17 \cdot 19} \cos 18\omega t - \frac{2}{23 \cdot 25} \cos 24\omega t + \dots \right] \quad (120.7)$$

Valoarea eficace a tensiunii redresate se obține luând media pătratică a expresiei (120.1):

$$U'_{d0 \text{ eficace}} = \sqrt{\frac{m}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} (\sqrt{2} U_2 \cos \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{1 + \frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m}} \quad (120.8)$$

Coefficientul de undulație al tensiunii redresate. Prin definiția coeficientului de undulație al unei mărimi nesinusoidale, în cazul de față se obține:

$$w = \frac{\sqrt{U_{d0 \text{ eficace}}^2 - U_{d0}^2}}{U_{d0}} \quad (120.9)$$

Introducând în (120.9) expresiile (120.3) și (120.8), rezultă:

$$w = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{m} - \frac{m^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{m}}}{\frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} \quad (120.10)$$

Ondulația armonicii de ordinul $n = km$ este, prin definiție, raportul dintre valoarea eficace a armonicii și valoarea medie a mărimii nesinusoidale; din relația (120.5) se obține:

$$w_n = \frac{|U(km)|}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{2}}{(km)^2 - 1} = \frac{\sqrt{2}}{n^2 - 1} \quad (120.11)$$

În tabela 15 sunt date valorile undulațiilor diverselor armonici, la redresoarele cu $m = 2-3-6-12$.

Tabela 15. Ondulația armoniilor la redresorul polifazat necomandat pe grilă

Ordinul armonicii $n = km$	Frecvența armonicii $f_n = n \cdot f$ Hz	Pulsația armonicii $\omega_n = n \cdot \omega$ rad/s	Numărul fazelor redresorului			
			2	3	6	12
2	100	628	47,13	—	—	—
3	150	942	—	17,7	—	—
4	200	1257	9,44	—	—	—
6	300	1885	4,95	4,05	4,05	—
8	400	2513	2,25	—	—	—
9	450	2827	—	1,77	—	—
10	500	3142	1,43	—	—	—
12	600	3770	0,99	0,99	0,99	0,99
14	700	4348	0,73	—	—	—
15	750	4712	—	0,63	—	—
16	800	5027	0,56	—	—	—
18	900	5655	0,44	0,44	0,44	—
20	1000	6283	0,36	—	—	—
21	1050	6597	—	0,32	—	—
22	1100	6912	0,29	—	—	—
24	1200	7540	0,25	0,25	0,25	0,25
26	1300	8168	0,21	—	—	—
27	1350	8482	—	0,19	—	—
28	1400	8796	0,18	—	—	—
30	1500	9425	0,16	0,16	0,16	—
32	1600	10048	0,14	—	—	—
33	1650	10367	—	0,13	—	—
34	1700	10682	0,12	—	—	—
36	1800	11310	0,11	0,11	0,11	0,11

Se observă în primul rând că undulațiile tensiunii la ieșire conțin numai armonici a căror frecvență este un multiplu al frecvenței rețelei de alimentare cît și al numărului fazelor redresorului. Dacă f reprezintă frecvența curentului alternativ de alimentare și m numărul fazelor redresorului, atunci frecvența unei armonicii oarecare este dată de kmf , în care k este un număr întreg oarecare; în al doilea rând se observă că o armonică de ordinul n are o valoare bine determinată, care este independentă de numărul fazelor redresorului, fapt care se explică prin relația (120.11).

Armonicile corespunzătoare ale curentului redresat depind de felul sarcinii redresorului. În cazul unei sarcini pur rezistive, armonicile sînt direct proporționale și în fază cu armonicile de tensiune corespunzătoare. Orice inductanță în circuitul de sarcină reduce pe de o parte mărimea unei armonicii oarecare de curent și pe de altă parte, produce un defazaj față de armonicile de tensiune corespunzătoare. Ambele influențe depind de raportul dintre reactanța și rezistența circuitului de sarcină la frecvența particulară considerată. O netezire perfectă a curentului continuu la ieșire se obține deci teoretic cu un șoc infinit de mare, în serie cu sarcina.

Pulsația unei mărimi nesinusoidale este, prin definiție, raportul dintre amplitudinea armonicii fundamentale și valoarea medie a mărimii nesinusoidale. În cazul de față:

$$s = \frac{\sqrt{2} U_{(1m)}}{U_{d0}} = \frac{2m \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{\pi \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{2}{m^2 - 1} \quad (120.12)$$

În tabela 16 sînt date valorile pulsației tensiunii redresate la redresoarele cu $m = 2-3-4-6-12$.

Tabela 16. Pulsația tensiunii la redresorul polifazat necomandat pe grilă

m	2	3	4	6	12
s	0,667	0,350	0,183	0,057	0,014

Redresorul necomandat pe grilă (cazul $\gamma \neq 0$). Forma tensiunii redresate. Dacă nu se neglijează reactanța de scăpări a transformatorului, ci numai rezistența și se consideră un reactor de sarcină cu inductanța teoretic infinită, tensiunea redresată are forma din fig. 191. Ea se compune din semisuma a două tensiuni de fază secundare în intervalul $(0 - \gamma)$ și dintr-o porțiune a tensiunii de fază în intervalul $(\gamma - \frac{2\pi}{m})$.

Expresia analitică a tensiunii redresate. Punînd:

$$u_{21} = \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right), \quad (120.13)$$

$$u_{22} = \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right), \quad (120.14)$$

expresia analitică a tensiunii redresate este:

$$u_d' = U_d' + \sum_{k=1}^{k=\infty} [a_{(km)} \sin(km \omega t) + b_{(km)} \cos(km \omega t)], \quad (120.15)$$

în care:

$$a_{(km)} = \frac{m}{\pi} \left\{ \int_0^{\gamma} \frac{1}{2} \left[\sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right) + \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) \right] \sin(km \omega t) d(\omega t) + \right. \\ \left. + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{m}} \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) \sin(km \omega t) d(\omega t) \right\} = \\ = \frac{m \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{2\pi} \left\{ \frac{\sin[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{\sin[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}; \quad (120.16)$$

$$b_{(km)} = \frac{m}{\pi} \left\{ \int_0^{\gamma} \frac{1}{2} \left[\sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right) + \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) \right] \cos(km \omega t) d(\omega t) + \right. \\ \left. + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{m}} \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) \cos(km \omega t) d(\omega t) \right\} = \\ = \frac{m \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{2\pi} \left\{ \frac{1 + \cos[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{1 + \cos[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}. \quad (120.17)$$

Valoarea medie a tensiunii redresate se poate obține din (118.14) punînd $\alpha = 0$:

$$U_d' = U_{d0}' \frac{1 + \cos \gamma}{2}. \quad (120.18)$$

Amplitudinea armonicii de ordinul $n = km$. Din (120.16) și (120.17) se obține:

$$|\sqrt{2} U_{(km)}| = \sqrt{a_{(km)}^2 + b_{(km)}^2}. \quad (120.19)$$

sau:

$$|\sqrt{2} U_{(km)}| = \frac{m \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{2\pi} \times \\ \times \sqrt{\left\{ \frac{\sin[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{\sin[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}^2 + \left\{ \frac{1 + \cos[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{1 + \cos[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}^2}. \quad (120.20)$$

$$\text{sau: } |\sqrt{2} U_{(km)}| = \frac{m \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}{2\pi} [M_k = \frac{1}{2} U_{d0}' M_k], \quad (120.20')$$

în care M_k este expresia radicalului din (120.20).

Ondulația armonicii de ordinul $n = km$. Conform definiției (120.11):

$$w_n = \frac{|U_{(km)}|}{U_d'}, \quad (120.21)$$

sau:

$$w_n = \frac{\sqrt{\left\{ \frac{\sin[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{\sin[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}^2 + \left\{ \frac{1 + \cos[(km+1)\gamma]}{km+1} - \frac{1 + \cos[(km-1)\gamma]}{km-1} \right\}^2}}{\sqrt{2} (1 + \cos \gamma)} \quad (120.22)$$

Valoarea eficace a tensiunii redresate se obține luînd media patratică a formei de undă din fig. 191:

$$U_{def}'^2 = \frac{m}{2\pi} \left\{ \int_0^{\gamma} \frac{1}{4} \left[\sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{m} \right) + \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) \right]^2 d(\omega t) + \right. \\ \left. + \int_{\gamma}^{\frac{2\pi}{m}} 2 U_2^2 \cos^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{m} \right) d(\omega t) \right\} \quad (120.23)$$

$$U_{def}'^2 = \frac{m 2 U_2^2}{2\pi} \left[\frac{1}{4} \sin 2\gamma \cdot \cos^2 \frac{\pi}{m} - \frac{1}{4} \sin 2 \left(\gamma - \frac{\pi}{m} \right) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \gamma \sin^2 \frac{\pi}{m} + \frac{1}{4} \sin \frac{2\pi}{m} + \frac{\pi}{m} \right]. \quad (120.24)$$

Coeficientul de ondulație al tensiunii redresate. Conform definiției (120.9):

$$w = \frac{\sqrt{U_{d0}^2 - U_d'^2}}{U_d'} \quad (120.25)$$

sau, din (120.18) și (120.24):

$$w = \frac{\sqrt{\frac{m\pi}{2} \left[\sin 2\gamma \cos^2 \frac{\pi}{m} - \sin 2\gamma \sin^2 \frac{\pi}{m} + \sin \frac{2\pi}{m} + \frac{4\pi}{m} \right]^2 - \frac{m^2}{\pi^2} \sin^2 \frac{\pi}{m} (1 + \cos \gamma)^2}}{m \sin \frac{\pi}{m} (1 + \cos \gamma)} \quad (120.26)$$

Pulsația tensiunii redresate. Conform definiției (120.12):

$$s = \frac{|\sqrt{2} U_{(1-m)}|}{U_d'} \quad (120.27)$$

Punând $k = 1$ în (120.20') și cu (120.18) se obține:

$$s = \frac{|\overline{M}_1|}{1 + \cos \gamma} \quad (120.27')$$

Redresor comandat pe grilă (cazul $\gamma = 0$). Forma tensiunii redresate. Dacă se neglijează impedanța de scurtcircuit a transformatorului și căderea de tensiune pe arc, tensiunea redresată are forma din fig. 226.

Expresia analitică a tensiunii redresate. Luând originea de timp în momentul aprinderii anodului I, tensiunea de fază secundară u_{21} se scrie:

$$u_{21} = \sqrt{2} U_2 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} + \alpha \right), \quad (120.28)$$

și expresia analitică a tensiunii redresate este:

$$u_{d0} = U_{d0}' + \sum_{k=1}^{k=\infty} [a_{(km)} \sin(km\omega t) + b_{(km)} \cos(km\omega t)], \quad (120.29)$$

în care:

$$a_{(km)} = \frac{m \sqrt{2} U_2}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} + \alpha \right) \sin(km\omega t) d(\omega t) = \quad (120.30)$$

$$= U_{d0}' \frac{2 km}{(km)^2 - 1} \sin \alpha;$$

$$b_{(km)} = \frac{m \sqrt{2} U_2}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{m}} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{m} + \alpha \right) \cos(km\omega t) d(\omega t) = \quad (120.30')$$

$$= - U_{d0}' \frac{2}{(km)^2 - 1} \cos \alpha.$$

Amplitudinea armonicii de ordinul $n = km$. Din (120.30) și (120.30') se obține:

$$|\sqrt{2} U_{(km)}| = \sqrt{a_{(km)}^2 + b_{(km)}^2} = U_{d0}' \frac{2}{(km)^2 - 1} \sqrt{1 + (km)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (120.31)$$

Se vede că amplitudinea armonicii crește repede cu α .

Pulsația tensiunii redresate. Conform definiției (120.12):

$$s = \frac{|\sqrt{2} U_{(1-m)}|}{U_{d0z}'}$$

Punând $k = 1$ în (120.3) și cu (118.2) se obține:

$$s = \frac{2}{(m^2 - 1) \cos \alpha} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (120.32)$$

Se vede că pulsația crește repede cu α .

121. Armonicele în rețeaua de curent alternativ. Când se examinează producerea armonicilor de curent alternativ de către redresoarele cu arc de mercur,



Fig. 234. — Curentul de linie la un redresor trifazat, cu conexiunea transformatorului din grupul I; $I_1 = 0,686 I_{max}$, $I_2 = 0,576 I_{max}$.

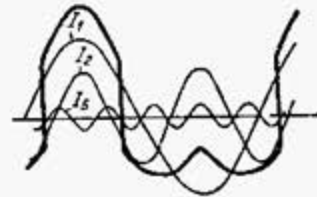


Fig. 235. — Curentul de linie la un redresor trifazat, cu conexiunea transformatorului din grupul al II-lea: $I_1 = 0,594 I_{max}$, $I_2 = 0,499 I_{max}$.

se poate considera tensiunea de alimentare sinusoidală. Dacă, în afară de aceasta se neglijează curentul de magnetizare al transformatorului, cum și efectul scăpărilor magnetice, problema ia o formă relativ simplă. În tratarea ei trebuie să se țină seamă că numai componenta fundamentală a curentului alternativ, împreună cu tensiunea sinusoidală a rețelei pot produce putere reală (activă). Armonicile în rețeaua de curent alternativ au o influență mică asupra randamentului redresorului însă provoacă înrăutățirea factorului de putere. Această înrăutățire a factorului de putere se exprimă printr-un factor de distorsiune, a cărui semnificație va fi arătată mai jos. Abaterile de la forma sinusoidală a curentului de linie depind în mare măsură de tipul de conexiune utilizat. În cazul unui redresor trifazat, care alimentează o sarcină neinductivă, există două forme de undă ale curentului (fig. 234 și fig. 235) corespunzând la următoarele două grupuri de conexiuni de transformatoare:

Grupul I: stea-stea; triunghi-stea interconectată;

Grupul al II-lea: triunghi-stea; stea-stea interconectată.

O analiză a acestor două forme de undă arată că armonicile de ordin multiplu de 3 lipsesc, iar toate celelalte există. Se mai vede că mărimea diferitelor armonici exprimate în procente din fundamentală este aceeași pentru ambele forme de undă. Numai relațiile de fază ale armonicilor față de fundamentală sînt diferite după cum se vede din fig. 234 și 235.

Situația este similară în cazul unui redresor hexafazat, în care curentul de linie poate avea două forme de undă diferite. La redresoarele hexafazate sînt deosebit două tipuri fundamentale de conexiuni de transformatoare:

a) Conexiunea hexafazată, fără egalizare de fază, în care curentul redresat este purtat numai de un anod la un moment dat, astfel încît fiecare fază secundară a transformatorului poartă, pe rînd curentul continuu total, în timpul unei șesimi din perioada tensiunii.

b) Conexiuni hexafazate cu egalizare de fază, în care prin mijloace auxiliare (transformatoare interfază sau egalizatoare de fază), curentul redresat este dat de doi

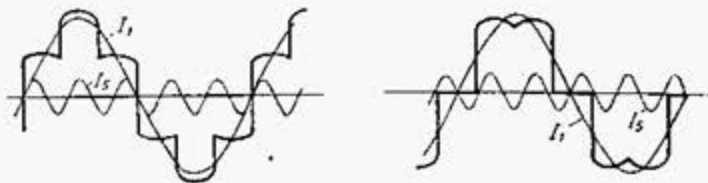


Fig. 236. — Curentul de linie la un redresor hexafazat, cu conexiunea transformatorului din grupul I: $I = 0,676 I_{max}$, $I_1 = 0,646 I_{max}$.

Fig. 237. — Curentul de linie la un redresor hexafazat, cu conexiunea transformatorului din grupul al II-lea: $I = 0,678 I_{max}$, $I_1 = 0,45 I_{max}$.

anozi în același timp, astfel încît fiecare fază secundară a transformatorului poartă pe rînd o jumătate din curentul continuu total, în timpul unei treimi din perioada tensiunii.

Avînd în vedere această distincție, rezultă următoarele două grupe de conexiuni corespunzătoare formelor de undă ale curentului de linie arătate în fig. 236 și fig. 237.

Grupa I: triunghi-stea în furcă, fără egalizare de fază; triunghi-stea, cu egalizare de fază; stea-stea în furcă, cu egalizare de fază.

Grupa II: triunghi-stea, cu egalizare de fază; stea-stea în furcă, cu egalizare de fază; stea-stea, cu egalizare de fază; triunghi-stea în furcă, cu egalizare de fază.

Analiza formelor de undă ale curentului de linie din fig. 236 și fig. 237 indică absența tuturor armonicilor pare, pe lângă absența armonicilor de ordin multiplu de 3, după cum s-a văzut în fig. 234 și 235. La prima vedere s-ar părea că curba din fig. 236 se apropie mai mult de o sinusoidă decît cea din fig. 237. La o examinare mai atentă, se constată însă că ambele curbe conțin aceleași armonici. Deosebirea în forma de undă se datorește faptului că armonicile corespunzătoare din cele două curbe sînt de semne contrarii.

După cum este de așteptat, analiza formei de undă a curentului de linie în redresoare dodecafazate arată absența tuturor armonicilor pare, cum și a frecvențelor multiplu de 3. Armonicile de curent care mai rămîn au o mărime relativ mică și deci curentul de linie este practic sinusoidal. Această proprietate împreună cu factorul de undulație mic al tensiunii de ieșire (v. tabela 15) face ca redresoarele dodecafazate să fie superioare redresoarelor hexafazate.

122. Influența filtrelor de netezire. Cînd se examinează efectul pe care-l au filtrele de netezire din circuitul de curent redresat asupra armonicilor curentului de linie, este convenabil să se considere cazul limită al unui șoc pe catod teoretic infinit de mare. În acest caz, curenții primari nu mai sînt formați din porțiuni de sinusoidă, ci se compun din dreptunghiuri, ca în fig. 238.

Frecvența și faza armonicilor curentului alternativ de alimentare nu sînt influențate de reactorul de netezire. Prezența inductanței în circuitul de sarcină al redresorului influențează numai mărimea acestor armonici. Deoarece inductanța se presupune foarte mare, amplitudinile diferitelor armonici de curent sînt invers proporționale cu frecvența lor. Această relație simplifică mult analiza, deoarece

se poate scrie $I_n = \frac{1}{n} I_1$ în care I_1 și I_n

sînt valorile eficace ale fundamentalei și ale armonicilor a n-a. Tabela 17 arată efectul unei neteziri perfecte a curentului redresat asupra armonicilor curentului de linie; valoarea diferitelor armonici este exprimată în procente din fundamentală. Se arată în plus la începutul fiecărei coloane valoarea eficace corespunzătoare a curentului de linie total.

Tabela 17 arată anumite analogii cu tabela 15 în ce privește influența numărului fazelor redresorului.

O armonică pe partea de curent redresat corespunde la două armonici pe partea de curent alternativ, una imediat inferioară și alta imediat superioară. De exemplu, armonica a 12-a pe partea de curent continuu se asociază totdeauna cu armonica a 11-a și 13-a a curentului de linie. Această analogie devine mai evidentă cînd se examinează legarea în paralel a redresoarelor.

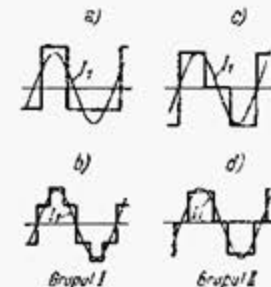


Fig. 238. — Curentii de linie în cazul unei neteziri perfecte a curentului redresat: a și c trifazat b și d hexafazat

$$\begin{aligned} a) & \begin{cases} I = 0,707 I_{max} \\ I_1 = 0,585 I_{max} \end{cases} & b) & \begin{cases} I = 0,707 I_{max} \\ I_1 = 0,675 I_{max} \end{cases} \\ c) & \begin{cases} I = 0,816 I_{max} \\ I_1 = 0,675 I_{max} \end{cases} & d) & \begin{cases} I = 0,816 I_{max} \\ I_1 = 0,778 I_{max} \end{cases} \end{aligned}$$

Tabela 17. Armonicile curentului de linie în ipoteza unui curent redresat perfect constant

Armonici și frecvența	Bifazat		Trifazat		Hexafazat		Decafazat	
	Cu filtru de netezire	Fără filtru de netezire	Cu filtru de netezire	Fără filtru de netezire	Cu filtru de netezire	Fără filtru de netezire	Cu filtru de netezire	Fără filtru de netezire
Rezultanta	111	100	121	119	104,5	105	101	101
Fundamentală, 50 Hz	100	100	100	100	100	100	100	100
Armonica a doua, 100 Hz	—	—	50,0	58,5	—	—	—	—
• a treia, 150 Hz	33,3	—	—	—	—	—	—	—
• a patra, 200 Hz	—	—	25,0	14,6	—	—	—	—
• a cincea, 250 Hz	20,0	—	20,0	12,1	20,0	22,6	—	—
• a șasea, 300 Hz	14,3	—	14,3	8,6	14,3	11,3	—	—
• a opta, 400 Hz	—	—	12,5	7,35	—	—	—	—
• a noua, 450 Hz	11,1	—	—	—	—	—	—	—
• a zecea, 500 Hz	—	—	10,0	6,0	—	—	—	—
• unsprezecea, 550 Hz	9,1	—	9,1	5,5	9,1	9,1	9,1	9,1
• treisprezecea, 650 Hz	7,7	—	7,7	4,6	7,7	6,5	7,7	7,4
• paisprezecea, 750 Hz	—	—	7,1	4,3	—	—	—	—

123. Efectul legării în paralel a redresoarelor asupra armonicilor. Se vor considera două redresoare hexafazate cu o putere debitată egală, funcționnd în paralel pe partea de curent continuu și luînd putere de la o sursă comună de curent alternativ.

Pentru cazul în care conexiunile hexafazate ale celor două redresoare aparțin aceluiași grup, armonicile produse de cele două redresoare sînt fiecare în fază, atît pe partea de curent continuu, cît și pe partea de curent alternativ. După cum se poate vedea din fig. 239 a, rețeaua de curent continuu poartă armonica I_6 , pe cînd rețeaua de curent alternativ furnizează armonicile corespunzătoare I_5 și I_7 , așa cum este cazul la funcționarea normală hexafazată.

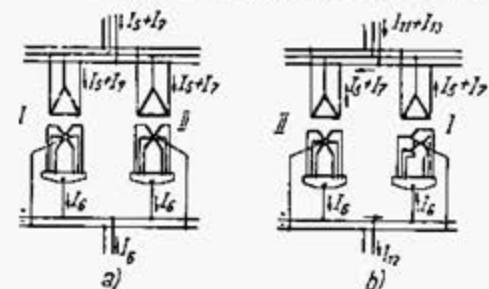


Fig. 239. — Legarea în paralel a redresoarelor hexafazate:

a — conexiunile redresoarelor aparțin aceluiași grup; b — conexiunile redresoarelor aparțin la grupuri diferite.

Condițiile sînt bineînțeles, cu totul diferite, cînd conexiunile hexafazate ale transformatoarelor celor două redresoare aparțin la grupuri diferite. În acest caz (fig. 239 b) armonica a șasea a tensiunii de ieșire a unui redresor este în antifază cu armonica a șasea a celui alt redresor, astfel încît un curent I_6 cu frecvența de șase ori frecvența de alimentare circulă între redresoare. Rețeaua de curent continuu nu este astfel încărcată de curentul armonic a șasea, însă poartă în schimb armonica imediat superioară, care, în acest caz, este armonica a 12-a. Prin urmare, în ce privește alimentarea de curent continuu, cele două redresoare funcționează ca o unitate dodecafază, pentru care armonica de amplitudine maximă are o frecvență de 12 ori mai mare decît a curentului alternativ de alimentare. O situație similară se găsește pe partea de intrare a celor două redresoare. Aici diferitele armonici de curent alternativ sînt de asemenea în antifază, astfel încît între cele două transformatoare circulă curenți armonici. Cele două armonice corespunzătoare armonicii a șasea de pe partea de curent continuu, sînt de frecvență multiplu de 5 și 7 (I_5 și I_7 în fig. 239b). Dar, fiindcă în acest caz, aceste armonici circulă prin bobinajul primar al celor două transformatoare hexafazate, primele două armonici de curent care se absorb de la linie sînt cele două armonici de frecvență imediat superioară, adică I_{11} și I_{13} .

Găsim astfel că armonicile care apar atît în rețeaua de curent alternativ, cît și în rețeaua de curent continuu, sînt cele care corespund funcționării dodecafazate, cu toate că ambele redresoare au conexiuni hexafazate.

124. Relații generale ale regimului deformant¹⁾. În cazul unui regim sinusoidal de tensiuni și curenți, sînt valabile următoarele relații între puterea aparentă S , puterea activă sau reală P și puterea reactivă Q :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad (124.1)$$

$$S = UI; \quad (124.2)$$

$$P = UI \cos \varphi; \quad (124.3)$$

$$Q = UI \sin \varphi; \quad (124.4)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}; \quad (124.5)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (124.6)$$

Acste relații justifică așa-numitul «triunghi al puterilor» din fig. 240a în care φ este defazajul sau deplasarea de fază dintre tensiunea sinusoidală U și curentul sinusoidal I .

În cazul unui regim nesinusoidal sau deformant, între puterile produse de o tensiune $u = \sqrt{2} \sum U_n \sin(n\omega t + \alpha_n)$ și un curent $i = \sqrt{2} \sum I_n \sin(n\omega t + \beta_n)$, se stabilesc următoarele relații:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}; \quad (124.7)$$

$$S = \sqrt{\sum U_n^2} \cdot \sqrt{\sum I_n^2} = UI; \quad (124.8)$$

$$P = \sum U_n I_n \cos \varphi_n; \quad (124.9)$$

$$Q = \sum U_n I_n \sin \varphi_n;$$

$$D = \sqrt{\sum U_n^2 I_n^2 + U_n^2 I_n^2 - 2 U_n I_n \cos(\varphi_n - \varphi_m)} \quad (124.10)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}; \quad (124.11)$$

$$\sqrt{1 - \lambda_r^2} = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}; \quad (124.12)$$

$$\lambda_r = \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{S}\right)^2}. \quad (124.13)$$

În care: $\varphi_n = \alpha_n - \beta_n$ și $\varphi_m = \alpha_m - \beta_m$;

λ — factorul de putere activă în regim deformant¹⁾;

λ_r — factorul de putere reactivă în regim deformant¹⁾;

D — puterea deformantă.

Relațiile de mai sus justifică așa-numitul «paralelipiped al puterilor» din fig. 240b, în care $P_c = \sqrt{Q^2 + D^2}$ este puterea fictivă sau complementară.

Se vede că:

$$\cos \alpha_0 = \frac{P}{S} = \lambda; \quad (124.14)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}; \quad (124.15)$$

$$\cos \alpha_0 \leq \cos \alpha_1 \leq 1. \quad (124.16)$$

În cazul cînd tensiunea este sinusoidală și numai curentul este nesinusoidal, relațiile (124.11) și (124.13) se reduc la:

$$\lambda = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1; \quad (124.17)$$

$$\lambda_r = \sqrt{1 - \frac{I_1^2}{I^2} \sin^2 \varphi_1}. \quad (124.18)$$

¹⁾ Din relațiile scrise, se poate demonstra că $\lambda \leq \lambda_r \leq 1$.

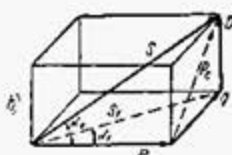


Fig. 240. — Triunghiul și paralelipipedul puterilor:

a — triunghiul puterilor în regim sinusoidal; b — paralelipipedul puterilor în regim deformant.

¹⁾ v. vol. I, cap. III § 362—364.

în care: I_1 este valoarea eficace a fundamentalei curentului;

I — valoarea eficace totală a curentului;

φ_1 — defazajul sau deplasarea de fază dintre fundamentala curentului și tensiune.

125. **Efectul regimului deformant asupra puterii de calcul a transformatorului redresorului.** *Relații fundamentale.* În cazul redresorului cu arc de mercur în care tensiunea de linie se poate presupune sinusoidală, problema determinării factorului de putere se simplifică și este posibilă atât o interpretare fizică, cât și o soluție grafică. Se poate scrie pentru tensiunea de linie $u = \sqrt{2} U \sin \omega t$.

Curentul de linie nesinusoidal se poate reprezenta printr-o serie Fourier $i = \sum (\sqrt{2} I_n) \sin (n\omega t - \varphi_n)$ de unde rezultă o valoare eficace:

$$I = \sqrt{\sum I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{I_1^2 + I_{df}^2}, \quad (125.1)$$

în care I_1 este valoarea eficace a fundamentalei, iar I_{df} valoarea eficace a tuturor armonicilor sau componenta deformantă. Fundamentală, fiind un curent sinusoidal, se poate descompune în două componente: componenta activă $I_a = I_1 \cos \varphi_1$ și componenta reactivă $I_r = I_1 \sin \varphi_1$. Se obține atunci relația:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_{df}^2, \quad (125.2)$$

care este reprezentată vectorial în fig. 241. Fundamentală și cele două componente ale sale se află în planul sinusoidal (arătat hașurat). Componenta activă de curent I_a este în fază cu tensiunea de linie U ; componenta reactivă I_r este în urmă cu 90° electrice față de tensiune, pe cind fundamentală I_1 este în urma tensiunii U cu unghiul de fază φ_1 . Componenta deformantă I_{df} este la 90° față de planul sinusoidal. Înmulțind relația cu $3U^2$ se obține ca mai sus o relație corespunzătoare pentru puteri:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2, \quad (125.3)$$

în care $S = \sqrt{3} \cdot U I$ este puterea totală aparentă absorbită de la linie; $P = \sqrt{3} \cdot U I_1 \cos \varphi_1$ este puterea utilă sau activă, $Q = \sqrt{3} \cdot U I_1 \sin \varphi_1$ este puterea reactivă și $D = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots I_n^2 + \dots}$ este puterea deformantă. Puterea complementară definită prin suma vectorială a puterii deformante și puterii reactive este, în acest caz:

$$P_c = \sqrt{3} \cdot U I_c = \sqrt{3} \cdot U \sqrt{I_r^2 + I_{df}^2} = \sqrt{3} \cdot U \sqrt{I_1^2 \sin^2 \varphi_1 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2 + \dots} \quad (125.4)$$

Asfel, factorul de putere al redresorului este:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1. \quad (125.5)$$

În mod analog se obține *factorul de distorsiune*:¹⁾

$$\mu_0 = \frac{\sqrt{S^2 - D^2}}{S} = \frac{\sqrt{I^2 - I_{df}^2}}{I} = \frac{I_1}{I}. \quad (125.6)$$

¹⁾ Factorul de distorsiune poate fi privit și ca un factor de putere deformantă, deoarece cu ajutorul lui se poate calcula puterea deformantă $D = S \sqrt{1 - \mu_0^2}$.

Factorul de putere al redresorului rezultă în cele din urmă:

$$\lambda = \mu_0 \cos \varphi_1. \quad (125.7)$$

În această expresie φ_1 reprezintă unghiul de defazaj dintre tensiune și fundamentală curentului și se numește *factorul de deplasare*. Factorul de putere reactivă λ_r , cu care se poate calcula puterea reactivă consumată de redresor se găsește din:

$$\lambda_r = \frac{\sqrt{S^2 - Q^2}}{S} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2 \sin^2 \varphi_1}}{I} = \sqrt{1 - \mu_0^2 \sin^2 \varphi_1}. \quad (125.8)$$

Relația (125.8) poate fi scrisă sub forma:

$$\lambda_r = \delta \cos \varphi_1, \quad (125.9)$$

în care:

$$\delta = \sqrt{1 + (1 - \mu_0^2) \operatorname{tg}^2 \varphi_1} \quad (125.10)$$

din care se vede că factorul de putere reactivă λ_r este, în mod practic, identic cu factorul de deplasare $\cos \varphi_1$. De exemplu, valoarea lui δ pentru un redresor hexafazat în plină sarcină este aproximativ 1,002, dacă se ia în considerare curentul de magnetizare al transformatorului. În orice caz, dacă se ia $\lambda_r = \cos \varphi_1$ eroarea este acoperitoare, deoarece Q dat de $S \sin \varphi_1$ este de fapt ceva mai mare decât valoarea exactă dată de $S \sqrt{1 - \lambda_r^2}$.

Atât factorul de putere, cât și factorul de deplasare se pot determina cu ajutorul unui wattmetru, voltmetru și ampermetru. Prin definiție:

$$\lambda = \frac{P}{U I}. \quad (125.11)$$

Prin metoda celor două wattmetre se obține:

$$W_1 = k U I \mu_0 \cos \left(\frac{\pi}{6} - \varphi_1 \right); \quad (125.12)$$

$$W_2 = k U I \mu_0 \cos \left(\frac{\pi}{6} + \varphi_1 \right), \quad (125.13)$$

de unde:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2}, \quad (125.14)$$

din care se poate determina $\lambda_r = \cos \varphi_1$. Factorul de distorsiune se obține în cele

din urmă din $\mu_0 = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1}$.

126. **Efectul reactanței de scăpări a transformatorului sau a suprapunerii curenților anodici.** În redresorul cu arc de mercur producerea unui unghi de deplasare între curentul și tensiunea anodică se datorește suprapunerii diferiților curenți anodici în timpul comutației, care este provocată de reactanța de scăpări a transformatorului anodic. În acest caz, întârzierea în comutația arcului, exprimată prin unghiul de comutație sau suprapunere γ , se produce așa cum s-a arătat la § 88 și depinde în plus de sarcina redresorului. Este de așteptat prin urmare ca deplasarea de fază între curentul primar și tensiunea de fază să depindă de unghiul de suprapunere,

ceea ce înseamnă că factorul de deplasare al redresorului trebuie să varieze și el cu sarcina. Examinând fig. 242 se vede că lucrurile se petrec în realitate în acest mod; curbele *a* și *b* arată forma de undă a tensiunii la ieșire și a curentului anodic în cazul unui redresor bifazat sau monofazat dublu alternanță. Curba *c* arată situația relativă dintre curentul primar și tensiunea de fază primară, în ipoteza că forma de undă a curentului este dreptunghiulară, adică neglijând efectul reactanței de scăpări a transformatorului care tinde să micșoreze viteza de creștere sau descreștere a curentului la începutul și sfârșitul fiecărei alternanțe.

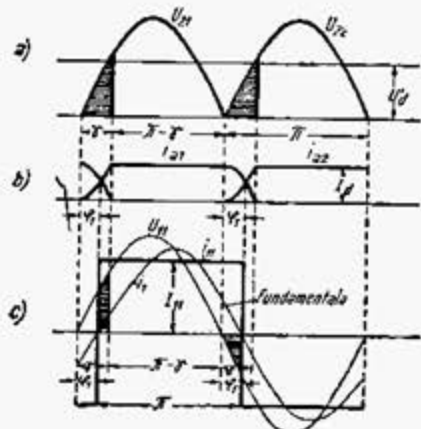


Fig. 242. — Deplasarea de fază datorită comutației:

a — tensiunea redresată; b — curentul anodic; c — curentul primar.

Tensiunile produse de reactanță sînt indicate în fig. 242a, prin porțiunile hașurate. Puterea reactivă produsă de aceste tensiuni împreună cu curentul redresat trebuie să fie nulă, luată pe un întreg ciclu deoarece prin definiție valoarea medie a oricărei puteri reactive este nulă. În consecință, produsul dintre curent și tensiune, în timpul intervalului de la φ_1 la γ , de la începutul alternanței pozitive, trebuie să fie egal și de semn contrar cu produsul luat pe intervalul de la zero la φ_1 la începutul alternanței negative. Astfel, din fig. 242c se obține condiția:

$$\int_{\varphi_1}^{\gamma} \frac{1}{2} U_{11} I_{11} \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{\pi+\varphi_1} \frac{1}{2} U_{11} I_{11} \sin \omega t d(\omega t) = 0, \quad (126.1)$$

sau:

$$(\cos \varphi_1 - \cos \gamma) + [\cos \pi - \cos (\pi + \varphi_1)] = 0, \quad (126.2)$$

din care rezultă:

$$\cos \varphi_1 = (1 + \cos \gamma)/2 = \cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right). \quad (126.3)$$

Din relațiile (73.3) și (92.5):

$$\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{U'_d}{U'_{d0}}, \quad (126.4)$$

astfel încît se obține:

$$\cos \varphi_1 = \frac{U'_d}{U'_{d0}}. \quad (126.5)$$

Această relație fundamentală are o importanță deosebită și poate fi exprimată în termeni generali în modul următor: dacă pierderile ohmice în redresor și în transformatorul anodic se neglijează, factorul de deplasare este dat de raportul dintre tensiunea medie la ieșire, în plină sarcină și tensiunea în gol.

Factorul de distorsiune este de asemenea o funcție de sarcina redresorului. Cînd se neglijează efectul suprapunerii, sau cînd sarcina este redusă $\gamma \cong 0$, curenții anodici au o formă de undă dreptunghiulară și curenții de linie iau forma arătată în fig. 238. În acest caz, valorile factorului de distorsiune în funcție de numărul de faze al redresorului, se pot deci lua din tabela 18, ținînd seama că $\mu_0 = I_1/I$ ($I =$ valoarea eficace a curentului de linie; $I_1 =$ valoarea eficace a fundamentalei curentului de linie).

Tabela 18. Factorul de distorsiune la sarcini reduse sau cînd $\gamma \cong 0$

m	2	3	6	12
μ_0	0,9	0,826	0,955	0,988

Efectul reactanței de scăpări a transformatorului nu este însă numai o deplasare a formei de undă a curentului primar, ci și o modificare a suprapunerii curenților anodici și prin aceasta, o schimbare a distorsiunii curentului primar în comparație cu situația în gol. După cum s-a spus mai sus, ambele modificări depind de sarcina redresorului, care determină mărirea suprapunerii pentru o reactanță de scăpări dată. O mărire a sarcinii provoacă pe de o parte o scădere a distorsiunii relative și pe de altă parte o creștere a deplasării curentului în raport cu tensiunea. Cu alte cuvinte, pe măsură ce sarcina crește, factorul de distorsiune crește, și în același timp factorul de deplasare scade, efectul din urmă predominînd eventual pînă dîncolo de o suprasarcină de 25 %—50 % în cazul cînd transformatorul anodic are o reactanță de scăpări normală. Creșterea factorului de distorsiune cu sarcina este proporțională cu reducerea valorii eficace a curenților anodici și deci este determinată de factorul $\sqrt{1 - m_f(\gamma)}$ din fig. 193. Factorul de distorsiune la o sarcină dată se poate deci obține din relația:

$$\mu = \frac{\mu_0}{\sqrt{1 - m_f(\gamma)}}. \quad (126.6)$$

Fig. 243 arată variația lui $\cos \varphi_1$, μ și λ cu sarcina, exprimată prin $\cos \gamma$, pentru cazul funcționării unui redresor hexafazat în conexiune dublu-trifazată. Diagramele sînt tipice în ce privește relațiile dintre aceste mărimi și suprapunerea curenților anodici.

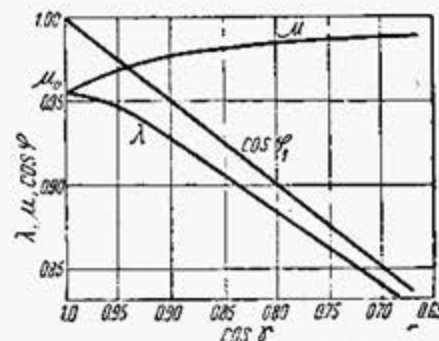


Fig. 243. — Variația factorului de distorsiune, factorului de deplasare și factorului de putere cu unghiul de comutație.

127. Influența comenzii pe grilă asupra factorului de putere și asupra producerii armonice. Faptul că grila de comandă oferă un mijloc de reglare a tensiunii prin intermediul unei comutații *întrziată artificială*, adică un mijloc complet independent de întârzierea naturală datorită suprapunerii curenților anodici, ridică imediat problema efectului unei astfel de comenzi asupra factorului de putere al redresorului. În fig. 244 căderea tensiunii la ieșire datorită întârzierii comutației

prin unghiul de comandă α este indicată prin zona hașurată ¹⁾. Există o relație bine definită între tensiunea medie la ieșire $U'_{d\alpha}$ și unghiul α care s-a văzut la § 118:

$$\cos \alpha = \frac{U'_{d0\alpha}}{U'_{d0}} \quad (127.1)$$

în care: U'_{d0} este tensiunea medie redresată fără considerarea căderii de tensiune pe arc și a efectului reactanței de scăpări, la $\alpha = 0$.

$U'_{d0\alpha}$ — tensiunea medie redresată în sarcină, în aceleași condiții, însă $\alpha \neq 0$.

Dacă se neglijează toate pierderile, puterea debitată pe partea de curent continuu trebuie să fie egală cu puterea reală absorbită pe partea de curent alternativ. Se poate scrie următoarea ecuație a puterilor:

$$U'_{d0\alpha} \cdot I_d = S \mu_0 \cos \varphi_1 \quad (127.2)$$

Factorul de distorsiune μ_0 fiind egal cu λ în cazul $\gamma = 0$ și $\alpha = 0$ (v. fig. 243) este dat de raportul dintre puterea în curent continuu la bornele secundare ale transformatorului P_d (adică puterea de ieșire în kW a redresorului, în ipoteza unei căderi de tensiune nule în redresor) și puterea aparentă S în kVA, absorbită de la linie. Rezultă:

$$\mu_0 = \frac{P_d}{S} = \frac{U_{d0} I_d}{S} \quad (127.3)$$

astfel încât relația (127.2) se reduce la:

$$U'_{d0\alpha} = U'_{d0} \cdot \cos \varphi_1 \quad (127.4)$$

Comparând această relație cu relația (127.1), se ajunge la concluzia importantă $\cos \varphi_1 = \cos \alpha$.

Cu alte cuvinte: *dacă pierderile de putere într-un redresor cu grilă comandată și în transformatorul său se neglijează, atunci factorul de deplasare este numeric egal cu cosinusul unghiului de comandă.*

Comparând relația (126.5) cu (127.4), se vede că în cazul redresoarelor cu grilă comandată, factorul de deplasare este direct proporțional cu tensiunea medie la ieșire.

Examinând fig. 244, se înțelege imediat această proprietate. Datorită comenzii pe grilă, curentul anodic i_a este în urma tensiunii anodice u_a , cu unghiul α . În consecință, curentul primar corespunzător i_{11} este de asemenea în urma tensiunii de fază primare u_{11} cu același unghi. Neglijând efectul suprapunerii, se vede din diagrama

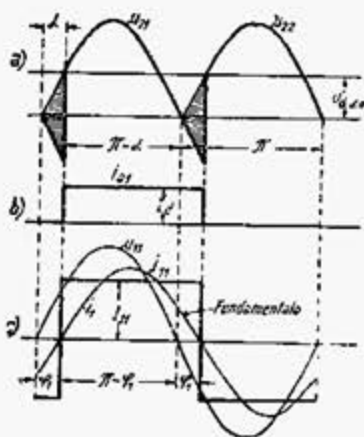


Fig. 244. — Deplasarea de fază datorită comenzii pe grilă:
a — tensiunea redresată; b — curentul anodic; c — curentul primar.

¹⁾ În această figură, care corespunde unui redresor bifazat ($m = 2$), unghiul de comandă α este identic cu unghiul de aprindere α_a . Relația dintre aceste două unghiuri, cum s-a văzut la § 118 este: $\alpha_a = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha$.

că deplasarea de fază a fundamentalei curentului primar este identică cu unghiul de comandă α . Dacă efectul de suprapunere se ia în considerare, deplasarea de fază totală a curentului primar este egală cu suma deplasărilor separate datorite comenzii de grilă și suprapunerii, adică $\varphi_1 = \alpha + \gamma$. Cu alte cuvinte, relația $\cos \varphi_1 = U'_{d0\alpha} / U'_{d0}$ este valabilă în toate cazurile, independent de faptul că reducerea tensiunii la ieșire se datorește comenzii pe grilă sau reactanței de scăpări a transformatorului. Această relație universală se poate exprima astfel: *într-un redresor cu arc de mercur, reducerea factorului de deplasare este direct proporțională cu reducerea tensiunii de curent continuu la ieșire.*

Influența comenzii pe grilă asupra factorului de putere al unui redresor hexafazat tipic se arată în fig. 245, 246, 247 și 248. Diagrama a din fig. 245 arată tensiunea de ieșire, iar diagrama b arată formele curentului de ieșire I_d , în cazul $\alpha = 0^\circ$ și $U'_{d0\alpha} = U'_{d0}$. Diagrama c arată curentul de linie corespunzător I_1 , care este în fază cu tensiunea U_1 , deoarece efectul suprapunerii a fost neglijat, din motive de simplificare. În fig. 246 se arată descompunerea în armonici a curentului din fig. 245. În acest caz, nu numai componenta fundamentală, dar și armonicile curentului de linie I_1 sînt în fază cu tensiunea U_1 .

În fig. 247 în comparație cu fig. 245 se arată efectul întîrzierii momentului de aprindere cu un unghi $\alpha = 60^\circ$. Tensiunea medie la ieșire $U'_{d0\alpha}$ scade la jumătate, deoarece anozii încep să conducă curentul de sarcină I_d cu $1/6$ de perioadă mai târziu. Din acest motiv, curentul de linie I_1 este în urma tensiunii de linie cu un unghi de fază $\varphi_1 = 60^\circ$. În același timp, distorsiunea curentului este nemodificată ¹⁾, după cum se poate vedea comparînd fig. 248 și fig. 246. În acest caz, alți componente — componenta activă $I_a = I_1 \cos \varphi_1$, în fază cu tensiunea U_1 și componenta reactivă $I_r = I_1 \sin \varphi_1$, la 90° față de U_1 .

Rezultă că odată cu întîrzierea momentului de aprindere prin comanda pe grilă, se produce un consum foarte important de putere reactivă. De fapt, încărcarea redresorului cu putere reactivă crește repede pe măsură ce tensiunea la ieșire scade, relația fiind exprimată prin:

$$Q = S \sqrt{1 - \lambda^2} \cong S \sin \varphi_1 = S \sqrt{1 - (U'_{d0\alpha} / U'_{d0})^2} \quad (127.5)$$

În această privință, redresorul cu grilă de comandă diferă mult de tipul normal, în care deplasarea de fază rar depășește o valoare maximă de 25° până la 30° , care are loc la plină sarcină.

128. Construcția grafică pentru determinarea puterilor în regim deformant. Legătura dintre diferitele componente ale curentului de linie și unghiul de comandă este reprezentată grafic în fig. 249. Cu ajutorul unei astfel de diagrame, este relativ simplu să se evalueze puterea activă, puterea reactivă și puterea deformantă absorbite de redresor de la sursa de curent alternativ, la diferitele valori ale tensiunii medii de ieșire, determinată de relația fundamentală $U'_{d0\alpha} = U'_{d0} \cdot \cos \alpha$. Tensiunea U_1 între fază și neutru și componenta activă I_a a curentului de linie sînt luate în ordonate, pe cînd componenta reactivă a curentului I_r și componenta

¹⁾ În mod riguros, această afirmație este valabilă numai dacă netezirea curentului redresat I_d este aproape perfectă pentru orice sarcină și orice unghi de comandă. Dacă lipsește reactorul de netezire, formele de undă pe partea de curent alternativ vor varia. O creștere a unghiului de comandă α va fi urmată nu numai de o deplasare de fază, dar și de o variație a mărimii diferitelor armonici.

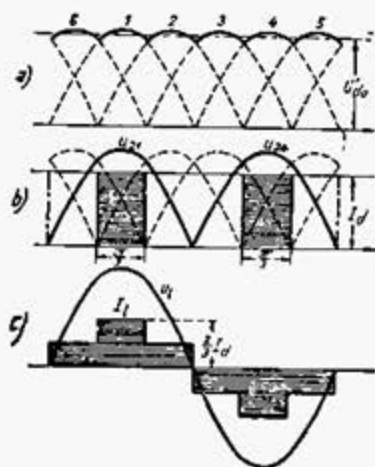


Fig. 245. — Curenții și tensiunile la $\alpha = 0^\circ$ și netezire perfectă a curentului continuu.

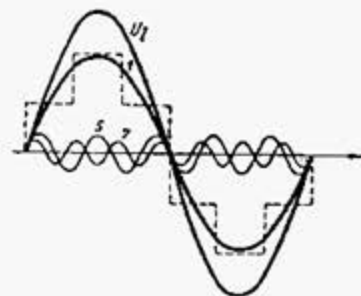


Fig. 246. — Descompunerea curentului de linie în componentele sale fundamentale și armonice.

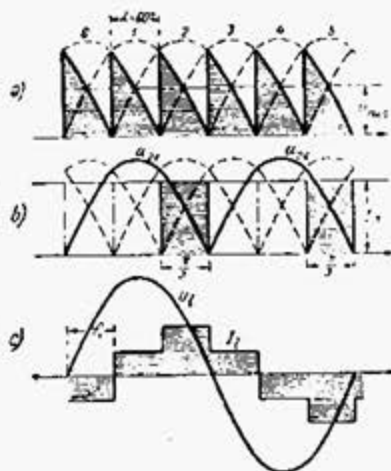


Fig. 247. — Curenții și tensiunile la $\alpha = 60^\circ$ și netezire perfectă a curentului continuu.

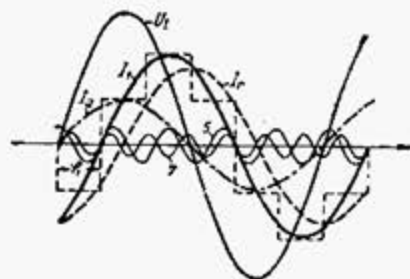


Fig. 248. — Descompunerea curentului de linie în componentele sale activă, reactivă și deformantă.

complimentară $I_c = \sqrt{I_r^2 + I_d^2}$ sînt luate în abscise. La tensiunea maximă de ieșire ($\alpha = 0^\circ$) I_a este reprezentat de segmentul OA și I_{dl} de segmentul AB , astfel încît OB reprezintă atunci curentul de linie I_l . Componenta reactivă I_r este în acest caz nulă. Cu $\alpha = 60^\circ$, de exemplu, tensiunea se reduce la jumătate și I_a este reprezentat de $OC = \frac{1}{2} (OA)$ deoarece curentul redresat la ieșire s-a redus și el la jumătate.

Componenta reactivă $I_r = I_1 \sin \varphi_1 = I_1 \sin \alpha$ este atunci reprezentată de CD . Suma vectorială a acestor două componente, segmentul OD , reprezintă deci componenta fundamentală I_1 a curentului de linie, care are aceeași valoare ca mai înainte, deci $OD = OA$. Curentul de linie I_l trebuie și el să aibă aceeași valoare ca mai sus, deoarece componentele fundamentale și armonice rămîn nemodificate cînd unghiul de comandă α se schimbă. Punind $DF = AB$ și ducînd arcul FE cu centrul în C , se obține: $CE = CF = \sqrt{CD^2 + DF^2}$. Deci CE reprezintă componenta reactivă I_r a curentului de linie. În sfîrșit, OE reprezintă curentul de linie $I_l = \sqrt{I_a^2 + I_c^2}$.

Factorul de deplasare $\cos \varphi_1$ este dat de raportul OC/OD . Factorul de putere λ este dat atunci de raportul OC/OE , pe cînd factorul de distorsiune μ_0 este dat de raportul OD/OE .

Deși orice schimbare în unghiul de aprindere are în general un efect prea mic asupra mărîmii armonicilor curentului alternativ absorbit de un redresor cu grilă de comandă, armonicele în tensiunea redresată cresc foarte mult, cu cît momentul de aprindere este întîrziat mai mult. Influența poate fi apreciată analizînd forma de undă a tensiunii la ieșire, în cazul general cînd comutația este întîrziată cu un unghi α prin comanda de grilă.

Folosind relația (120.31) valoarea eficace a armonicii a n -a față de frecvența rețelei este:

$$U_n = \frac{\sqrt{2(1 - n^2 \tan^2 \alpha)}}{n^2 - 1} U_{d0} \quad (128.1)$$

Ținînd seamă că factorul de deplasare este identic cu cosinusul unghiului de comandă, se poate scrie ecuația (128.1) sub forma:

$$U_n = \frac{U_{d0}}{n^2 - 1} \sqrt{2 \left(1 - n^2 + \frac{n^2}{\cos^2 \varphi_1} \right)} \quad (128.2)$$

Tabela 19 și fig. 250 dau valorile eficace ale diferitelor armonici în gol, exprimate în procente din tensiunea medie la ieșire U_{d0} pentru diferite valori ale factorului de deplasare $\cos \varphi_1$. Se vede că valorile corespunzătoare la $\cos \varphi_1 = 1$ ($\alpha = 0$) sînt egale cu valorile date în tabela 15 așa cum era de așteptat.

129. Calculul exact al factorilor de putere. În legătură cu fig. 240, s-au introdus doi factori de putere: $\cos \alpha_0 = \lambda$ și $\cos \alpha_1$. Cu ajutorul acestor factori se poate găsi puterea reactivă și puterea deformantă, cunoscînd puterea reală a redresorului.

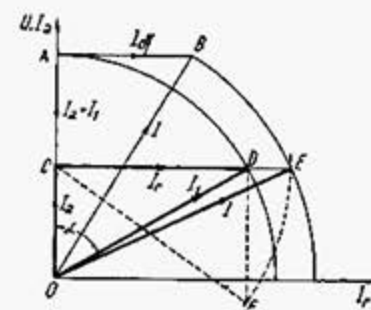


Fig. 249. — Relații grafice între unghiul de comandă și componentele curentului de linie.

Tabela 19. Armonicile redresorului comandat pe grilă în funcție de factorul de deplasare sau de unghiul de comandă

Frecvența armoniei	Factorul de deplasare ($\cos \varphi$)						
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
	$\alpha = 0^\circ$	$18^\circ 12'$	$25^\circ 50'$	$31^\circ 48'$	$36^\circ 52'$	$41^\circ 24'$	$45^\circ 55'$
2 $f = 100$ Hz	47,13	56,55	66,05	75,00	84,90	95,50	107,00
3 $f = 150$ Hz	17,87	34,72	31,10	37,45	43,50	50,10	56,77
4 $f = 200$ Hz	9,44	15,55	20,50	25,16	29,67	34,65	39,58
6 $f = 300$ Hz	4,05	8,91	12,37	15,55	18,29	21,69	25,08
8 $f = 400$ Hz	2,25	6,29	9,98	11,37	13,54	16,11	18,45
9 $f = 450$ Hz	1,77	5,51	7,85	10,04	12,02	14,14	16,32
10 $f = 500$ Hz	1,43	4,88	7,03	8,98	10,68	12,38	14,56
12 $f = 600$ Hz	0,99	4,06	5,79	7,43	8,84	10,53	12,02
14 $f = 700$ Hz	0,73	3,32	4,95	6,22	7,55	8,90	10,32
15 $f = 750$ Hz	0,63	3,15	4,56	5,83	7,07	8,25	9,62
16 $f = 800$ Hz	0,56	2,90	4,24	5,45	6,64	7,78	8,98
18 $f = 900$ Hz	0,44	2,68	3,92	4,98	5,96	6,96	8,00
20 $f = 1000$ Hz	0,36	2,40	3,51	4,48	5,41	6,36	7,28
21 $f = 1050$ Hz	0,32	2,19	3,25	4,17	5,02	5,93	6,85
22 $f = 1100$ Hz	0,29	2,12	3,10	3,96	4,79	5,62	6,45
24 $f = 1200$ Hz	0,25	1,91	2,82	3,61	4,38	5,19	6,01

Se vor da aici câteva formule generale pentru calculul acestor factori de putere, în diferite ipoteze.

α) *Transformator ideal cu sarcină rezistivă fără reactor de nelezire.* În cazul unui regim de curent neîntrerupt (§ 118), se găsește¹⁾:

$$\cos \alpha_1 = \cos \arctg \frac{\frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \sin 2\alpha}{1 + \frac{m}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{m} \cos 2\alpha}, \quad (129.1)$$

pentru m oarecare și:

$$\cos \alpha_0 = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left(\frac{1}{2} \cos 2\alpha + \frac{\pi}{3} \right)}, \quad (129.2)$$

pentru $m = 6$.

În cazul unui regim de curent întrerupt (§ 118), se găsește:

$$\cos \alpha_1 = \cos \left\{ \arctg \frac{\frac{m}{2\pi} \left[1 + \cos 2 \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right]}{1 + \frac{m}{2\pi} \left[\pi - 2\alpha - \sin 2 \left(\alpha - \frac{\pi}{m} \right) \right]} \right\}, \quad (129.3)$$

pentru m oarecare și:

$$\cos \alpha_0 = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left[\frac{2\pi}{3} - \alpha - \frac{1}{2} \sin \left(2\alpha - \frac{\pi}{3} \right) \right]}, \quad (129.4)$$

pentru $m = 6$.

¹⁾ A. Glaser und K. Müller-Lübeck - Einführung in die Theorie der Stromrichte, Julius Springer Berlin 1935, p. 262-265.

În fig. 251 s-a reprezentat variația factorilor $\cos \alpha_1$ și $\cos \alpha_0$, în funcție de raportul $\frac{U_{d\alpha 0}}{U_{d0}}$ dintre tensiunea medie redresată cu comandă pe grilă și fără comandă; diagrama a corespunde cazului fără reactor, diagrama b corespunde cazului unui reactor cu reactanță infinit de mare.

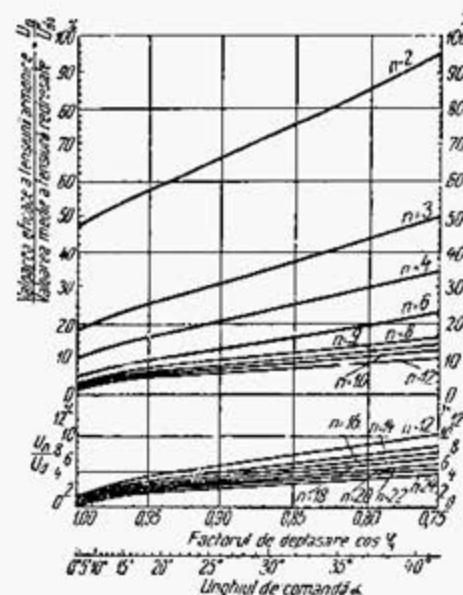


Fig. 250. — Relația dintre factorul de deplasare și valoarea eficace a tensiunilor armonice ale tensiunii redresate.

β) *Transformator real, sarcină rezistivă cu reactor de nelezire.* Dacă nu se neglijează reactanțele de scăpări și curentul de mers în gol, se găsește, în ipoteza unui reactor de nelezire infinit de mare:

$$\cos \alpha_0 = \frac{\mu_0 \cdot \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)]}{\sqrt{1 - 2m \sin^2 \frac{\pi}{m} \cdot \psi(\gamma, \alpha) + 2\mu_0 \chi \cdot \chi(\gamma, \alpha) + \chi^2}}; \quad (129.5)$$

$$\cos \alpha_1 = \cos \left\{ \arctg \frac{\chi(\gamma, \alpha) + \frac{\chi}{\mu_0}}{\frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos (\alpha + \gamma)]} \right\}, \quad (129.6)$$

În care funcțiile universale $\psi(\gamma, \alpha)$ și $\chi(\gamma, \alpha)$ au expresiile:

$$\psi(\gamma, \alpha) = \frac{[2 + \cos(2\alpha + \gamma)] \sin \gamma - \gamma [1 + 2 \cos \alpha \cos(\alpha + \gamma)]}{2\pi [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]^2}; \quad (129.7)$$

$$\chi(\gamma, \alpha) = \frac{2\gamma + \sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \gamma)}{4 [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]}. \quad (129.8)$$

În fig. 252 s-a reprezentat variația funcției $\psi(\gamma, \alpha)$ cu unghiul de comutație γ , pentru diferite valori ale unghiului de comandă α .

În fig. 253 s-a reprezentat variația funcției $\chi(\gamma, \alpha)$ cu unghiul de comutație γ , pentru diferite valori ale unghiului de comandă α . Curbele punctate corespund la o sarcină constantă, exprimată indirect prin unghiul de comutație γ_0 , corespunzător la $\alpha = 0$.

Factorul μ_0 este factorul ideal de distorsiune, care corespunde cazului $\alpha = 0$ și $\gamma = 0$; el are și semnificația unui factor de putere ideal, deoarece în acest caz formula (129.6) se reduce la: $\lambda_0 = \cos \alpha_0 = \mu_0 = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$.

Factorul κ are valoarea procentuală a curentului de mers în gol al transformatorului față de curentul nominal.

În fig. 254 s-a reprezentat variația factorului de putere $\cos \alpha_1$ cu unghiul de comutație γ (sau indirect cu sarcina) pentru diferite valori ale unghiului de comandă α , în ipoteza unui curent de mers în gol neglijabil ($\kappa = 0$). Curbele punctate corespund la o sarcină constantă exprimată indirect prin unghiul de comutație γ_0 , corespunzător la $\alpha = 0$.

Din formulele (129.5), (129.6), (129.7) și (129.8) se pot obține o serie de cazuri particulare care pot interesa în practică. Deși în obținerea acestor formule s-a presupus un reactor de netezire infinit de mare, ele sînt utile în practică, pentru că, așa cum s-a spus la § 78, ipoteza teoretică a unei reactanțe infinit de mari în circuitul de sarcină, corespunde de fapt în practică la un reactor de netezire destul de mic. De altfel, această ipoteză s-a folosit în special la calculul unghiului de supra-punere sau comutație și o mică eroare asupra valorii acestui unghi nu influențează simțitor rezultatele obținute din formulele de mai sus.

b) Filtre de netezire pentru redresoarele polifazate

130. Elemente fundamentale. α) Tipuri de filtre. În cazul cînd, după specificul instalației alimentate, se cere o curbă de tensiune mai continuă decît aceea pe care o dă redresorul, se conectează în circuitul curentului redresat un element în plus, pentru netezirea tensiunii. Acest element se numește filtru de netezire.

Varianta cea mai simplă a acestui filtru conține sau o inductanță în serie (fig. 255a), (un simplu reactor de netezire) sau o capacitate în derivație (fig. 255b). În cazul mai general, filtrul se prezintă ca un evadripol (fig. 255c) care conține diferite impedanțe, în special reactanțe.

β) Coeficientul de netezire. Eficacitatea filtrului, în cazul unui element în serie se apreciază după coeficientul de netezire care este raportul dintre pulsația la ieșirea redresorului s_1 și la ieșirea filtrului s_2 :

$$\beta_s = \frac{s_1}{s_2}. \quad (130.1)$$

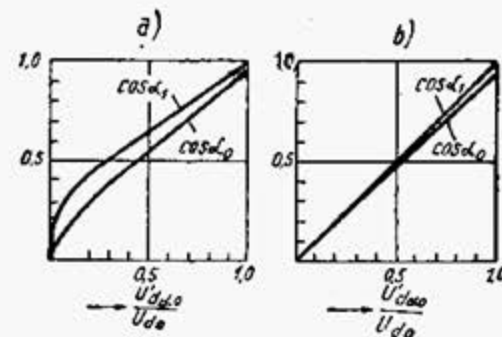


Fig. 251. — Factori de putere la un redresor hexafazat fără reactanțe de scăpări, cu sarcină rezistivă, în funcție de factorul de reglaj: a — fără reactor de netezire; b — cu reactor de netezire infinit.

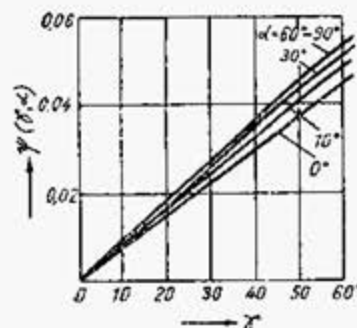


Fig. 252. — Funcția universală $\psi(\gamma, \alpha)$.

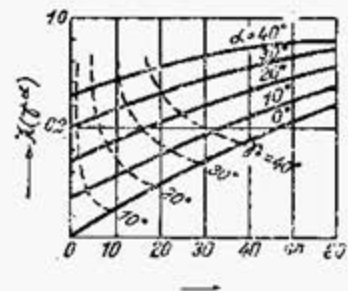


Fig. 253. — Funcția universală $\chi(\gamma, \alpha)$.

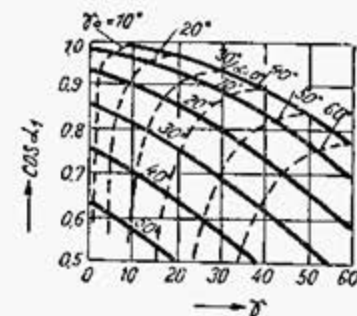


Fig. 254. — Factorul de putere $\cos \alpha_1$ la un redresor cu un număr de faze oarecare, cu reactanțe de scăpări, fără considerarea curentului de mers în gol.

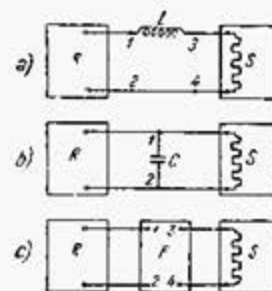


Fig. 255. — Scheme de principiu ale filtrelor: a — cu inductanță; b — cu capacitate; c — filtru complex.

Pulsatia s_2 la ieșirea din filtru, sau, la bornele sarcinii, se determină din relația:

$$s_2 = \frac{\sqrt{2} U'_{km}}{U_d} \quad (130.2)$$

în care: U'_{km} este amplitudinea armonicii de ordinul km la bornele sarcinii;

U_d — valoarea medie a tensiunii la bornele sarcinii.

În general, tensiunea medie la bornele sarcinii este diferită de tensiunea medie de la intrarea filtrului, deoarece filtrul conține, în afară de reactanță, și o rezistență. De obicei diferența este mică și pulsția s_1 la intrarea filtrului se poate calcula cu aceeași tensiune medie; atunci coeficientul de netezire rezultă direct ca raportul dintre amplitudinea armonicii de ordinul km la intrarea și la ieșirea filtrului:

$$\beta_s = \frac{U'_{km}}{U_{km}} \quad (130.3)$$

Dacă filtrul conține numai o capacitate în derivație, coeficientul de netezire se determină, de asemenea, după (130.1); dar în acest caz s_2 reprezintă pulsția redresorului la ieșire, înainte de introducerea capacității, iar s_1 după conectarea ei.

Elementele filtrului se aleg astfel încât să se obțină un coeficient maxim de netezire.

131. Filtrul cu inductanță. *a) Ipoteze de calcul.* Inductanța legată în serie (fig. 255a) preia cea mai mare parte a componentei alternative a tensiunii; ea limitează pulsațiile de curent din circuit și, astfel, tensiunea și curentul la bornele sarcinii apar mai netezite.

Pentru calculul aproximativ al unui filtru cu o inductanță cu rezistență foarte mică, se observă în primul rând că nu trebuie să se țină seamă de componenta continuă de tensiune din circuit (deoarece ea influențează numai componenta continuă a curentului) și nici de armonicile superioare ($k > 1$), deoarece cu creșterea ordinului armonicii, reactanța inductivă crește, și, prin urmare, dacă filtrul dă o netezire bună pentru armonica de ordinul m , el va da o netezire cu atât mai bună

pentru armonicile de ordin superior. Pentru calculul filtrului se folosește schema din fig. 256, care reprezintă un generator echivalent de curent alternativ, care debitează în circuitul de redresare numai armonica de ordinul m . Schema echivalentă nu conține elemente redresoare, deoarece se presupune că amplitudinea armonicii de curent de ordinul m este mai mică decât componenta continuă a curentului, astfel încât curentul redresat, în sarcină, este neîntrerupt.



Fig. 256. — Schema echivalentă a unui filtru cu inductanță.

β) Coeficientul de netezire. Conform definiției, coeficientul de netezire se determină din relația:

$$\beta_s = \frac{U_m}{U'_m} = \frac{U_m(2-1)}{U_m(1-2)} \quad (131.1)$$

Ținând seamă de faptul că prin circuit trece același curent, se poate introduce, în membrul din dreapta al relației (131.1), în locul raportului tensiunilor,

raportul impedanțelor înainte și după filtru. Dacă se neglijează rezistența bobinei în comparație cu reactanța ei inductivă $m\omega L$, se obține:

$$\beta_s = \frac{\sqrt{R^2 + (m\omega L)^2}}{R} \quad (131.2)$$

Deoarece de obicei $m\omega L \gg R$, pentru un calcul aproximativ, se poate neglija, la numărător, valoarea lui R^2 .

Atunci:

$$\beta_s \approx \frac{m\omega L}{R} \quad (131.3)$$

Avantajele și dezavantajele filtrului cu inductanță. Pentru valori mici ale rezistenței de sarcină R (cazul instalațiilor de curenti relativi mari) se obține o netezire satisfăcătoare, chiar dacă m este mic. Dezavantajele sînt:

- variația inductanței unei bobine cu miez de fier;
- apariția supratensiunilor în circuit, în cazul unei deconcentrări bruște a sarcinii.

132. Filtrul cu capacitate. *a) Ipoteze de calcul.* Un condensator legat în paralel cu rezistența de sarcină se încarcă în fracțiunile de perioadă în care tensiunea de la ieșirea redresorului crește și se descarcă apoi în circuitul de sarcină, contribuind la micșorarea variației tensiunii, așa cum s-a văzut la § 54. În fig. 257 se arată schema generală a unui redresor polifazat avînd un condensator în paralel cu sarcina.

Rezistența r introdusă în fiecare fază este o rezistență echivalentă în ce privește efectul rezistenței interne a elementelor redresoare și al rezistenței înfășurărilor transformatorului. Deoarece fiecare fază a unui redresor polifazat lucrează independent de celelalte faze, calculul schemei cu condensator se simplifică, dacă se consideră numai una dintre faze. În porțiunea de perioadă în care redresorul conduce, tensiunea la bornele condensatorului, din cauza rezistenței din circuitul anodic, este mai mică decât tensiunea de alimentare, cu căderea de tensiune $r \cdot i_d$, reprezentată de ordonatele suprafețelor hașurate din fig. 257 b și a.

În acest caz, curba tensiunii redresate $u_d = u_c$ este mai uniformă decât în cazul redresoarelor monofazate.

Pentru schema considerată, tensiunea armonicii de ordinul m la bornele capacității poate fi determinată în funcție de armonica de ordinul m a curentului capacitiv și reactanța ramurii capacitive $X_C = \frac{1}{m\omega C}$.

Pentru un calcul aproximativ, se poate presupune, în primul rând, că armonicile superioare ale curentului în rezistența de sarcină R sînt mult mai mici decât în ramura cu condensator, ceea ce permite să se determine armonica de ordinul

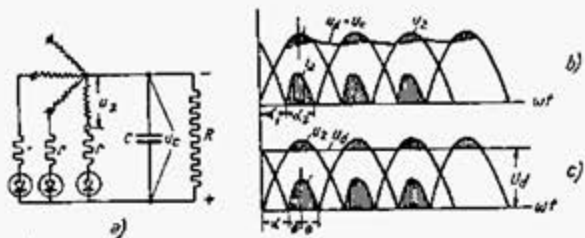


Fig. 257. — Acțiunea unui filtru cu capacitate, la un redresor polifazat:

a — schema de principiu; b — curenții și tensiunile la bornele elementelor redresoare; c — forma simplificată a tensiunilor și curenților.

m a curentului din condensator, direct din curba i_a . În al doilea rând, se poate determina curentul i_a , presupunând o valoare constantă u_d , care corespunde dreptei U_d din fig. 257c, luată în locul curbei din fig. 257b, unde u_d nu rămâne strict constantă. În acest caz, unghiul real de intrare în funcțiune α_1 și unghiul de conducție α_c al curentului redresat se înlocuiesc prin unghiurile $\frac{\pi}{2} - \theta = \alpha$ și $2\theta = \alpha_c$,

care pot fi determinate mai simplu și sînt situate simetric în raport cu sinusoida.

β) *Unghiul de conducție.* Regimul de funcționare pentru orice valoare a unghiului θ este asigurat (ca și în cazul unui redresor avînd în circuitul de sarcină o l.c.e.m.) prin alegerea potrivită a tensiunii secundare U_2 în raport cu valoarea dată U_d . Aceste tensiuni, cum rezultă din fig. 257c, sînt legate prin relația:

$$U_d = \sqrt{2} U_2 \cos \theta. \quad (132.1)$$

Alegerea unghiului θ se face, la rîndul său, în funcție de raportul dedus mai sus, dintre tensiunea de ieșire U_d și curentul de ieșire I_d . Curentul este, de asemenea, o mărime care se dă la calculul schemelor de redresare.

Valoarea medie a curentului de sarcină I_d , egală în perioada de conducție $\frac{2\pi}{m}$ cu valoarea medie a curentului din redresor (deoarece valoarea medie a curentului din condensator în aceeași perioadă este egală cu zero) se determină din relația:

$$I_d = I_a = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} i_a d(\omega t) = \frac{m}{2\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{\sqrt{2} U_2 (\cos \omega t - \cos \theta)}{r} d(\omega t) =$$

$$= \frac{m}{\pi} \cdot \frac{U_d}{r} (\lg \theta - \theta) \quad (132.2)$$

de unde:

$$\lg \theta - \theta = \frac{\pi r}{m} \cdot \frac{I_d}{U_d} = \frac{\pi}{m} \cdot \frac{r}{\eta} = A. \quad (132.3)$$

Ecuația (132.3) permite să se stabilească legătura căutată între unghiul ales θ și raportul cerut între curentul la intrare I_d și tensiunea de ieșire U_d (sau, ceea ce este același lucru, rezistența de sarcină R) pentru numărul de faze m dat și rezistența din circuitul anodic r cunoscută.

După relația (132.3) este construită curba din fig. 258a, care ușurează obținerea valorilor unghiului θ .

Amplitudinea armonicilor și pulsația. Cunoștînd unghiul θ , se poate trece la determinarea armonicii de ordinul m a curentului din redresor, egală, în virtutea aproximației de mai sus, cu armonica de ordinul m a curentului din condensator:

$$I_{mm} = \frac{m}{\pi} \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{\sqrt{2} U_2 (\cos \omega t - \cos \theta)}{r} \cos m\omega t d(\omega t) =$$

$$= \frac{U_d}{r} \cdot \frac{2 (\sin m\theta \cos \theta - m \cos m\theta \sin \theta)}{\pi (m^2 - 1) \cos \theta} = \frac{U_d}{r} f(\theta). \quad (132.4)$$

Amplitudinea armonicii de ordinul m a tensiunii de la bornele redresorului este:

$$U_{mm} = I_{mm} \cdot \frac{1}{m\omega C} = \frac{U_d}{rC} \cdot \frac{f(\theta)}{m\omega} \quad (132.5)$$

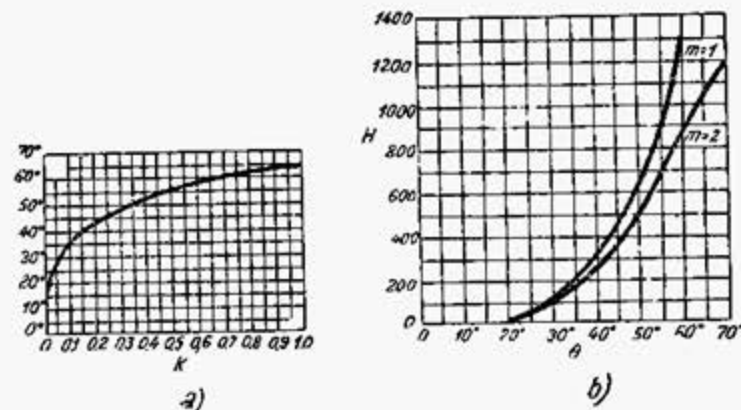


Fig. 258. - Curbe de calcul pentru filtrul cu condensator: a—funcția auxiliară a unghiului de conducție; b—funcția auxiliară pentru calculul armonicilor.

În acest caz, pulsația este:

$$s_2 = \frac{U_{mm}}{U_d} = \frac{1}{rC} \cdot \frac{f(\theta)}{m\omega} \quad (132.6)$$

Capacitatea de filtrați necesară. Pentru frecvența $f = 50$ Hz, capacitatea necesară exprimată în microfarazi, rezultă din (132.6):

$$C = \frac{1}{s_2 r} \cdot \frac{10^6}{314} \cdot \frac{f(\theta)}{m} = \frac{1}{s_2 r} H. \quad (132.7)$$

Valoarea lui H care conține, în afară de $f(\theta)$ și un coeficient numeric este dată de curba din fig. 258b, pentru $m = 1$ și $m = 2$; pentru alte valori m , se poate calcula $f(\theta)$ din relația (132.4).

Din (132.7) rezultă că valoarea capacității va fi cu atât mai mică, cu cît rezistența din circuitele anodice va fi mai mare.

➔ Dacă însă capacitatea C nu este singurul element al filtrului, ci numai elementul de intrare, atunci s_2 se determină după coeficientul parțial de netezire β_{s1} , care trebuie să fie asigurat de elementul capacitiv:

$$s_2 = \frac{s_1}{\beta_{s1}} \quad (132.8)$$

unde s_1 este pulsația fără filtru.

Cînd rezistența circuitelor anodice r este relativ mică, valorile capacității obținute din (132.7) se apropie de rezultatele calculate după o formulă și mai aproximativă (dedusă presupunînd că lipsesc total rezistențele în circuitele anodice).

Avantajele și dezavantajele filtrului cu capacitate. Filtrul cu capacitate poate fi utilizat efectiv numai în schemele de redresare pentru curenți mici. În aceste scheme, filtrul cu capacitate prezintă avantaje economice față de alte filtre.

Un dezavantaj al filtrului îl constituie faptul că prin redresor, trece un curent sub formă de impulsuri.

133. Filtrul în L. *Ipoteze de calcul.* Eficacitatea unei capacități legată în derivație crește mult, dacă înaintea ei se introduce o inductanță (fig. 259a) sau o rezistență (fig. 259b). Se ajunge astfel la filtrul L-C sau filtrul în L. Armonicile de curent condiționate de capacitatea legată în derivație, trec, în cazul unui filtru de acest fel, prin elementul serie, producând în el o cădere de tensiune și, astfel, tensiunea de la bornele sarcinii este mai netezită. De obicei se utilizează rar o rezistență ca element serie, deoarece ea produce o micșorare a componentei continue a tensiunii și o pierdere de putere.

Schema echivalentă a unui astfel de filtru L-C este dată în fig. 259c. Aici, ca și în schema echivalentă din fig. 256, redresorul este înlocuit printr-un generator de curent alternativ, care debitează în circuit armonica de ordinul m .

În acest caz, raportul amplitudinilor tensiunii armonice de ordinul m înaintea filtrului (bornele 1-2) și după filtru (bornele 3-4) care reprezintă coeficientul de netezire al filtrului, poate fi înlocuit prin raportul impedanțelor:

$$\beta_s = \frac{U_{mm(1-2)}}{U_{mm(3-4)}} = \left| \frac{jX_L + Z_p}{Z_p} \right|, \quad (133.1)$$

în care X_L este reactanța inductivă;

$$Z_p = -j \frac{RX_C}{R - jX_C} \text{ este impedanța ramurii în paralel.}$$

Deoarece pentru obținerea unei bune neteziri, capacitatea se alege astfel, încât reactanța capacitivă $X_C = \frac{1}{m\omega C}$ să fie mult mai mică decât rezistența de sarcină R , se poate lua aproximativ $Z_p \approx jX_C$; în acest caz:

$$\beta_s \approx \left| \frac{-jX_C + jX_L}{-jX_C} \right| = \left| 1 - \frac{X_L}{X_C} \right|. \quad (133.2)$$

Înlocuind:

$$X_L = m\omega L \text{ și } X_C = \frac{1}{m\omega C}, \quad (133.3)$$

se obține:

$$\beta_s \approx m^2 \cdot \omega^2 LC - 1 \text{ sau } LC = \frac{1 + \beta_s}{m^2 \cdot \omega^2}. \quad (133.4)$$

După formula (133.4) se poate calcula produsul LC , dar nu fiecare mărime în parte. O altă ecuație care leagă pe L și pe C se obține pe baza unor condiții suplimentare impuse filtrului de către consumator. De exemplu, în montajele de alimentare a instalațiilor de radio, a doua ecuație de legătură între L și C poate fi obținută din condiția de limitare a distorsiunilor, în forma curbei tensiunii care se obține în circuitul de sarcină (tuburi oscilatoare și amplificatoare) sau din condiția de limitare a supratensiunilor posibile la variații bruște ale sarcinii. Dacă consumatorul nu impune nici o altă condiție suplimentară, a doua ecuație necesară pentru calculul separat al valorilor L și C poate fi obținută, alegând astfel de valori uzuale pentru capacitate și inductanță, încât costul filtrului să rezulte minim.

Filtrul în L se utilizează în schemele de redresare, mai ales în legătură cu tuburile cu gaz.

γ) Coeficientul de netezire al filtrului R-C. Când în locul inductanței serie dintr-un filtru în L se utilizează o rezistență R_f , cum este cazul redresoarelor de putere mică, unde rezistența este folosită în același timp și ca potențiometrul (fig. 259b) coeficientul de netezire este:

$$\beta_s = \frac{s_1}{s_2} = \frac{U_{mm(1-2)}}{U_{mm(3-4)}} \cdot \frac{U_{d(3-4)}}{U_{d(1-2)}}. \quad (133.5)$$

După cum se vede, acesta depinde nu numai de raportul amplitudinilor armonice de ordinul m înainte și după filtru, dar și de micșorarea componentei continue a tensiunii de la valoarea $U'_d = U_{d(1-2)}$ la $U''_d = U_{d(3-4)}$.

Deoarece:

$$U_{d(1-2)} = U_{d(3-4)} + R_f I_d \quad (133.6)$$

și:

$$\frac{U_{d(3-4)}}{I_d} = R, \quad (133.7)$$

unde R este rezistența de sarcină, se obține pentru un filtru în L cu element rezistiv:

$$\beta_s = \frac{U_{mm(1-2)}}{U_{mm(3-4)}} = \frac{1}{1 + \frac{R_f}{R}}, \quad (133.8)$$

Înlocuind apoi raportul tensiunilor prin raportul rezistențelor înainte și după filtru (neglijând aici ca în cazul fig. 256 rezistența R) se obține:

$$\frac{U_{mm(1-2)}}{U_{mm(3-4)}} = \left| \frac{R_f - j \frac{1}{mC}}{-j \frac{1}{mC}} \right| \approx R_f \cdot m\omega C. \quad (133.9)$$

Substituind (în 133.8) rezultă:

$$\beta_s = R_f m\omega C \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_f}{R}}. \quad (133.10)$$

de unde:

$$R_f = \frac{\beta_s R}{m\omega CR - \beta_s}. \quad (133.11)$$

Rezistența filtrului depinde astfel de coeficientul de netezire necesar β_s , de capacitatea aleasă C și, într-o măsură mai mică, de rezistența de sarcină R .

8) *Coeficientul de netezire al filtrelor cu mai multe celule.* Când este necesar să se obțină coeficienți de netezire mari, este deseori mai economic să se întrebuițeze în loc de un singur filtru în L (filtru cu o celulă), un filtru din mai multe celule în L . Coeficientul total de netezire al unui filtru cu mai multe celule este produsul coeficienților de netezire parțiali:

$$\beta_s = \beta_{s1} \beta_{s2} \beta_{s3} \dots \quad (133.12)$$

Într-adevăr, dacă se consideră filtrul cu două celule reprezentat în fig. 259d, și se introduce ca factor intermediar în raportul care determină coeficientul total de netezire al filtrului mărimea $U_{mm}(3-4)$ se obține:

$$\beta_s = \frac{U_{mm}(1-2)}{U_{mm}(5-6)} = \frac{U_{mm}(1-2)}{U_{mm}(3-4)} \cdot \frac{U_{mm}(3-4)}{U_{mm}(5-6)} = \beta_{s1} \cdot \beta_{s2} \quad (133.13)$$

Generalizând relația obținută pentru un număr mai mare de celule, se ajunge la egalitatea de mai sus (133.12).

e) *Comparație între filtre cu una și cu două celule.* Pentru a compara coeficientul de netezire al unui filtru cu două celule (care necesită valori mai mici pentru L și C decât filtrul cu o celulă) cu cel al unui filtru cu o celulă, se ia un filtru cu două celule identice. În acest caz, coeficienții de netezire β_{s1} și β_{s2} sînt identici, iar coeficientul total de netezire este:

$$\beta_s = \beta_{s1} \beta_{s2} = \beta_{s1}^2, \quad (133.14)$$

de unde:

$$\beta_{s1} = \sqrt{\beta_s}. \quad (133.15)$$

Introducînd valoarea obținută β_{s1} în (133.4), se obține produsul LC al unei celule din filtrul cu două celule. Pentru ambele celule trebuie să se ia o mărime de două ori mai mare:

$$2LC = \frac{2^2 + 2\sqrt{\beta_s}}{m^2 \omega^2}. \quad (133.16)$$

Comparînd (133.4) cu (133.16), se poate observa ușor că pentru $s \gg 6$ filtrul cu două celule necesită o valoare mai mică a produsului LC .

Ținînd seamă însă de dimensiunile mai mari ale filtrului cu două celule și de costul mai mare al confecționării celor două bobine cu inductanța pe jumătate, față de al unei singure bobine cu inductanța necesară, în practică, filtrul cu două celule se utilizează numai cînd valoarea lui β_s depășește cîteva zeci.

134. *Filtrul în π .* Filtrul în π (fig. 260a) dă un coeficient de netezire și mai mare. Filtrul poate fi considerat ca fiind compus din două elemente: 1) condensatorul de intrare C_1 și 2) un filtru în L format din L și C_2 . Coeficientul total de netezire al filtrului în π este egal cu produsul coeficienților de netezire ai celulelor constitutive:

$$\beta_s = \beta_{s1} \cdot \beta_{s2}.$$

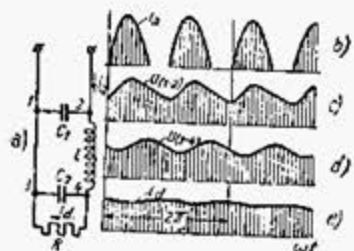


Fig. 260. — Schema și forma de undă a curentului și tensiunii la un filtru în π :

a — schema de principiu; b — curent redresat; c — tensiunea la intrare; d — tensiunea la ieșire; e — curentul din sarcină.

Funcționarea acestui filtru rezultă din diagramele curentului și tensiunii din fig. 260 b, c, d, e. Prima diagramă (fig. 260b) reprezintă curentul care circulă prin elementul redresor. Acest curent este în același timp curentul de intrare al filtrului.

Încărcarea periodică a condensatorului C_1 dată de o fracțiune a curentului de intrare și descărcarea ulterioară (în intervalul de anulare a curentului de intrare) pe sarcină face ca la bornele (1-2) curba tensiunii $U_{(1-2)}$ (fig. 260c) să fie o curbă continuă.

Valoarea relativă a amplitudinii armonicii de ordinul k pe care o conține această curbă reprezintă pulsația s_2 care depinde de capacitatea de intrare C_1 .

Dacă C_1 ar lipsi, pulsația s_1 ar putea fi determinată din (120.10) după valoarea relativă a amplitudinii armonicii de ordinul k direct la ieșirea redresorului.

Raportul $\beta_{s1} = \frac{s_1}{s_2}$ reprezintă coeficientul de netezire al primului element.

Capacitatea C_1 , calculată după valoarea s_2 din (132.7), depinde astfel de valoarea aleasă β_{s1} , care intră ca factor în produsul care dă coeficientul total de netezire β_s .

Celălalt factor β_{s2} reprezintă coeficientul de netezire al celei în L . Acțiunea acestei celule face ca curba tensiunii de la bornele 3-4 (fig. 260d) și a curentului de sarcină (fig. 260e) să fie mai netede decât curba tensiunii de la bornele 1-2.

Alegerea valorilor numerice ale coeficienților β_{s1} și β_{s2} , cînd produsul lor este cunoscut (coeficientul total de netezire a filtrului în π), este în mare parte arbitrară, dar există și aici factori de limitare:

- 1) necesitatea de a alege capacitatea și inductanța după tipurile curente;
- 2) tendința de a micșora cît mai mult dimensiunile filtrului;
- 3) tendința de a limita cît mai mult posibil impulsurile de curent din elementele redresoare.

Se tinde, de asemenea, ca C_1 și C_2 să fie, pe cît posibil, egali, cînd această cerință nu este în contradicție cu factorii indicați mai sus.

În cazul cînd filtrul cu o celulă în π necesită inductanțe și capacități mari, pentru a obține coeficientul de netezire necesar se adoptă, ca și în cazul filtrului în L , filtre în π cu 2-3 celule.

135. *Filtrul cu ramuri paralele rezonante.* Se poate obține un coeficient de netezire și mai mare dacă în locul unei capacități în derivație ca la filtrul în L și în π se leagă după inductanță, una sau mai multe ramuri rezonante serie, ca în fig. 261.

Se ajunge, în acest caz, la filtrul cu ramuri paralele rezonante. Fiecare ramură a acestui filtru prin alegerea inductanței și a capacității după relația:

$$L_n = \frac{1}{n^2 \omega^2 C_n} = \frac{1}{(km)^2 \omega^2 C_n}, \quad (135.1)$$

se aduce la rezonanță pe o armonică de un ordin oarecare k (k se ia egal cu 1, 2, 3 etc.).

La rezonanță, impedanța rezultată a ramurii este o rezistență compusă din:

- rezistența condensatorului r_{Cn} (care provine din pierderile în dielectric);
- rezistența bobinei r_{Ln} ;
- rezistența firelor de legătură r_{ln} ;

$$r_n = r_{Cn} + r_{Ln} + r_{ln}. \quad (135.2)$$

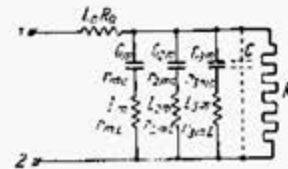


Fig. 261. — Filtru cu ramură în derivație formată din circuite-serie acordate.

Rezistența pierderilor în dielectric se determină în funcție de tangenta unghiului de pierderi și reactanța condensatorului:

$$r_{Cn} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{km \omega C_n} \quad (135.3)$$

În funcție de forma și de starea izolației, $\operatorname{tg} \delta$ la condensatoarele de filtraj este cuprinsă între 0,01 și 0,03.

Rezistența totală a inductanței și a firelor de legătură se apreciază înainte de a calcula inductanța, evaluând lungimile și secțiunile firelor de legătură, și folosind un coeficient α cu care se înmulțește rezistența r_{Cn} :

$$r_n = \alpha r_{Cn} \quad (135.4)$$

Valoarea lui α , după date practice este cuprinsă între 2,5 și 3,5.

Coeficientul de netezire al unei ramuri separate (coeficientul individual de netezire) se determină, analog cu formula dedusă pentru filtrul în L, din relația:

$$\beta_{sn} = \frac{km \omega L_n}{r_n} = \frac{km \omega L_n}{\alpha \operatorname{tg} \delta \cdot \left(\frac{1}{km \omega C_n} \right)} \quad (135.5)$$

După ce s-a ales capacitatea, formula (135.5) permite să se obțină coeficientul individual de netezire pentru o valoare dată inductanței L_n , sau valoarea inductanței L_n când se dă coeficientul individual de netezire β_{sn} pentru armonica de tensiune care urmează să fie calculată.

Aprecierea eficacității totale a unui filtru rezonant se face după coeficientul total de netezire care, pe baza legii însumării pătratice a diferitelor armonice în circuitele de curent nesinusoidal, poate fi scris sub forma:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{s_m^2 + s_{2m}^2 + s_{3m}^2 + \dots}{\left(\frac{s_m}{\beta_{sm}}\right)^2 + \left(\frac{s_{2m}}{\beta_{s2m}}\right)^2 + \left(\frac{s_{3m}}{\beta_{s3m}}\right)^2 + \dots}} \quad (135.6)$$

Aici s_m, s_{2m}, s_{3m} etc. sînt pulsațiile armonicilor de ordinul $m, 2m, 3m$ etc. la intrarea filtrului, iar $\frac{s_m}{\beta_{sm}}, \frac{s_{2m}}{\beta_{s2m}}, \frac{s_{3m}}{\beta_{s3m}}$ sînt coeficienții de pulsație ai armonicilor de tensiune la ieșirea din filtru.

Dacă la ieșirea din filtru toate armonicile trebuie să fie netezite deopotrivă, atunci coeficienții $\beta_{sm}, \beta_{s2m}, \beta_{s3m}$ se aleg negali, deoarece pulsațiile de la intrare nu sînt nici ele egale.

Într-o serie de dispoziții se aleg coeficienții β_{sm} negali; de aceea, acțiunea diferitelor armonici poate fi diferită. De exemplu, în cazul căilor ferate electrice, unde se utilizează multe filtre rezonante, valoarea admisibilă a armonicilor în firul de linie (care alimentează motorul trenului) este determinată după gradul necesar de atenuare al acțiunii inductive a armonicilor asupra liniilor aeriene telefonice care se află de-a lungul căilor ferate electrice. Compararea acțiunii diferitelor armonici se face, în acest caz, ținînd seamă de acțiunea acustică asupra unui receptor telefonic. Ca unitate de comparație a acestei acțiuni a fost adoptată aceea a frecvenței de 800 Hz. Pentru această frecvență, coeficientul de acțiune acustică a fost luat egal cu unitatea. Pentru alte frecvențe, coeficientul se deter-

mină prin ordonatele curbei prezentată în fig. 262. Dacă se introduce coeficientul de acțiune acustică, formula (135.6) ia forma:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{(s_m p_m)^2 + (s_{2m} p_{2m})^2 + (s_{3m} p_{3m})^2 + \dots}{\left(\frac{s_m p_m}{\beta_{sm}}\right)^2 + \left(\frac{s_{2m} p_{2m}}{\beta_{s2m}}\right)^2 + \left(\frac{s_{3m} p_{3m}}{\beta_{s3m}}\right)^2 + \dots}} \quad (135.7)$$

unde p_m, p_{2m} și p_{3m} sînt coeficienții de acțiune acustică care se determină după curba din fig. 262.

La calculul coeficienților individuali de netezire după (135.5) care satisfac, în ansamblul lor, coeficientul total de netezire calculat după (135.6) sau (135.7) se pot realiza cheltuieli minime pentru condensatoare și pentru inductanțele filtrelor și de asemenea pentru inductanța principală. Criteriul costului minim stă la baza alegerii soluției optime dintr-o serie de soluții posibile.

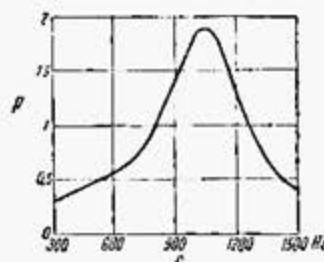


Fig. 262. — Variația coeficientului de acțiune acustică cu frecvența.

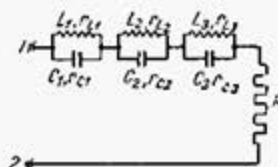


Fig. 263. — Filtru cu circuite antirezonante legate în serie (filtrul dop).

Când se utilizează filtrele rezonante, trebuie să se țină seamă de scăderea gradului de netezire, când frecvența rețelei de alimentare a redresorului se îndepărtează de la valoarea dată.

Înrăutățirea netezirii este provocată, în acest caz, de îndepărtarea de la rezonanță și de apariția în ramurile rezonante a unor reactanțe, pe lângă rezistențele care intră la numitorul formulei (135.5).

Gradul de înrăutățire poate fi ușor calculat, dacă se cunosc parametrii filtrului.

136. Filtru cu circuite antirezonante, legate în serie (filtrul dop). O altă variantă a utilizării rezonanței pentru mărirea coeficientului de netezire al filtrului constă în legarea în serie — în circuitul de redresare — a mai multor circuite antirezonante ca în fig. 263. În acest caz, ajungem la filtre cu circuite antirezonante legate în serie, care datorită reactanței mari pe care o opun armonicilor pe care sînt acordate, se numesc *filtre-dop*.

La rezonanță, când valorile inductanței și capacității satisfac ecuația (135.1) și rezistențele de pierderi ale condensatorului și inductanței pot fi luate egale, deoarece sînt foarte mici, impedanța rezultantă a circuitului acordat este o rezistență pură și egală cu:

$$r_{ne} = \frac{1}{2} \left(r_n + \frac{L_n}{r_n C_n} \right); \quad (136.1)$$

unde $r_n = r_{Cn} + r_{Ln}$. Rezistența r_{Cn} se calculează, de asemenea, după (135.3), iar rezistența inductanței r_{Ln} se ia egală cu r_{Cn} . Rezistența firelor de legătură se consideră inclusă în r_{Cn} și în r_{Ln} .

Rezistența pierderilor în dielectric se determină în funcție de tangenta unghiului de pierderi și reactanța condensatorului:

$$r_{Cn} = \frac{\lg \delta}{km \omega C_n} \quad (135.3)$$

În funcție de forma și de starea izolației, $\lg \delta$ la condensatoarele de filtraj este cuprinsă între 0,01 și 0,03.

Rezistența totală a inductanței și a firelor de legătură se apreciază înainte de a calcula inductanța, evaluând lungimile și secțiunile firelor de legătură, și folosind un coeficient α cu care se înmulțește rezistența r_{Cn} :

$$r_n = \alpha r_{Cn} \quad (135.4)$$

Valoarea lui α , după date practice este cuprinsă între 2,5 și 3,5.

Coeficientul de netezire al unei ramuri separate (coeficientul individual de netezire) se determină, analog cu formula dedusă pentru filtrul în L din relația:

$$\beta_{sn} = \frac{km \omega L_n}{r_n} = \frac{km \omega L_n}{\alpha \lg \delta \cdot \left(\frac{1}{km \omega C_n} \right)} \quad (135.5)$$

După ce s-a ales capacitatea, formula (135.5) permite să se obțină coeficientul individual de netezire pentru o valoare dată inductanței L_n , sau valoarea inductanței L_n când se dă coeficientul individual de netezire β_{sn} pentru armonica de tensiune care urmează să fie calculată.

Aprecierea eficacității totale a unui filtru rezonant se face după coeficientul total de netezire care, pe baza legii însumării pătratice a diferitelor armonice în circuitele de curent nesinusoidal, poate fi scris sub forma:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{s_m^2 + s_{2m}^2 + s_{3m}^2 + \dots}{\left(\frac{s_m}{\beta_{sm}}\right)^2 + \left(\frac{s_{2m}}{\beta_{s2m}}\right)^2 + \left(\frac{s_{3m}}{\beta_{s3m}}\right)^2 + \dots}} \quad (135.6)$$

Aici s_m, s_{2m}, s_{3m} etc. sînt pulsațiile armonicilor de ordinul $m, 2m, 3m$ etc. la intrarea filtrului, iar $\frac{s_m}{\beta_{sm}}, \frac{s_{2m}}{\beta_{s2m}}, \frac{s_{3m}}{\beta_{s3m}}$ sînt coeficienții de pulsație ai armonicilor de tensiune la ieșirea din filtru.

Dacă la ieșirea din filtru toate armonicile trebuie să fie netezite deopotrivă, atunci coeficienții $\beta_{sm}, \beta_{s2m}, \beta_{s3m}$ se aleg neegali, deoarece pulsațiile de la intrare nu sînt nici ele egale.

Într-o serie de dispozitive se aleg coeficienții β_{sm} neegali; de aceea, acțiunea diferitelor armonici poate fi diferită. De exemplu, în cazul căilor ferate electrice, unde se utilizează multe filtre rezonante, valoarea admisibilă a armonicilor în firul de linie (care alimentează motorul trenului) este determinată după gradul necesar de atenuare al acțiunii inductive a armonicilor asupra liniilor aeriene telefonice care se află de-a lungul căilor ferate electrice. Compararea acțiunii diferitelor armonici se face, în acest caz, ținînd seamă de acțiunea acustică asupra unui receptor telefonic. Ca unitate de comparație a acestei acțiuni a fost adoptată aceea a frecvenței de 800 Hz. Pentru această frecvență, coeficientul de acțiune acustică a fost luat egal cu unitatea. Pentru alte frecvențe, coeficientul se deter-

mină prin ordonatele curbei prezentată în fig. 262. Dacă se introduce coeficientul de acțiune acustică, formula (135.6) ia forma:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{(s_m p_m)^2 + (s_{2m} p_{2m})^2 + (s_{3m} p_{3m})^2 + \dots}{\left(\frac{s_m p_m}{\beta_{sm}}\right)^2 + \left(\frac{s_{2m} p_{2m}}{\beta_{s2m}}\right)^2 + \left(\frac{s_{3m} p_{3m}}{\beta_{s3m}}\right)^2 + \dots}} \quad (135.7)$$

unde p_m, p_{2m} și p_{3m} sînt coeficienții de acțiune acustică care se determină după curba din fig. 262.

La calculul coeficienților individuali de netezire după (135.5) care satisfac, în ansamblul lor, coeficientul total de netezire calculat după (135.6) sau (135.7) se pot realiza cheltuieli minime pentru condensatoare și pentru inductanțele filtrelor și de asemenea pentru inductanța principală. Criteriul costului minim stă la baza alegerii soluției optime dintr-o serie de soluții posibile.

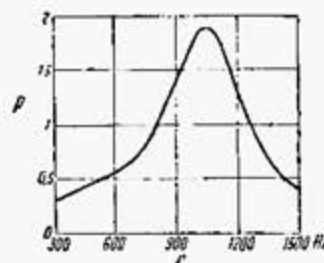


Fig. 262. — Variația coeficientului de acțiune acustică cu frecvența.

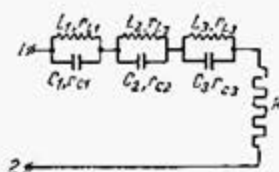


Fig. 263. — Filtru cu circuite antirezonante legate în serie (filtrul dop).

Cînd se utilizează filtrele rezonante, trebuie să se țină seamă de scăderea gradului de netezire, cînd frecvența rețelei de alimentare a redresorului se îndepărtează de la valoarea dată.

Înrăutățirea netezirii este provocată, în acest caz, de îndepărtarea de la rezonanță și de apariția în ramurile rezonante a unor reactanțe, pe lângă rezistențele care intră la numitorul formulei (135.5).

Gradul de înrăutățire poate fi ușor calculat, dacă se cunosc parametrii filtrului.

136. Filtru cu circuite antirezonante, legate în serie (filtrul dop). O altă variantă a utilizării rezonanței pentru mărirea coeficientului de netezire al filtrului constă în legarea în serie — în circuitul de redresare — a mai multor circuite antirezonante ca în fig. 263. În acest caz, ajungem la filtre cu circuite antirezonante legate în serie, care datorită reactanței mari pe care o opun armonicilor pe care sînt acordate, se numesc *filtre-dop*.

La rezonanță, cînd valorile inductanței și capacității satisfac ecuația (135.1) și rezistențele de pierderi ale condensatorului și inductanței pot fi luate egale, deoarece sînt foarte mici, impedanța rezultantă a circuitului acordat este o rezistență pură și egală cu:

$$r_{ne} = \frac{1}{2} \left(r_n + \frac{L_n}{r_n C_n} \right); \quad (136.1)$$

unde $r_n = r_{Cn} + r_{Ln}$. Rezistența r_{Cn} se calculează, de asemenea, după (135.3), iar rezistența inductanței r_{Ln} se ia egală cu r_{Cn} . Rezistența firelor de legătură se consideră inclusă în r_{Cn} și în r_{Ln} .

Fiecare celulă a filtrului-dop lucrează, în raport cu armonica pe care este acordată, ca un filtru în L cu celule rezistive în serie. De aceea, coeficientul individual de netezire al unei celule de acest fel, în cazul unei capacități la ieșirea filtrului, poate fi determinat pe baza relației (133.9) din:

$$\beta_{sn} = km\omega C_{rne} \quad (136.2)$$

În cazul când capacitatea de ieșire lipsește, coeficientul individual de netezire se determină din:

$$\beta_{sn} = \frac{r_{ne} + R}{R} \quad (136.3)$$

unde R este rezistența de sarcină:

Coeficientul total de netezire al unui filtru-dop se determină din (135.6), după găsirea coeficienților de netezire individuali. Alegerea parametrilor diferitelor celule se face ținând seamă de costul minim al celulelor.

Când frecvența de alimentare a redresorului diferă de cea dată, rezistența aparentă a filtrului-dop scade și coeficientul de netezire se micșorează.

L. Proiectarea redresoarelor

137. **Principii de calcul generale.** Ca regulă generală, punctul de plecare în proiectarea unei instalații de redresor este puterea de curent continuu pe care trebuie să o dea redresorul, exprimată în funcție de tensiunea redresată U_d și de curentul redresat I_d , la plină sarcină.

Calculul redresorului se face pe etape, din care cea mai importantă este determinarea datelor constructive ale transformatorului de alimentare anodic. Se presupune cunoscute constantele electrice ale rețelei de curent alternativ. De obicei se poate presupune că puterea absorbită de redresor de la rețea este neglijabilă față de capacitatea de putere a acestei rețele, astfel încât tensiunea ei rămâne constantă, oricare ar fi mărimea și felul sarcinii impuse de redresor. Această presupunere este valabilă în majoritatea cazurilor, cu excepția cazului, relativ puțin probabil, când un mare număr de substații redresoare de tracțiune ar constitui sarcina de bază a unei rețele de înaltă tensiune izolate. În acest caz, sarcina redresoarelor în ansamblu are un efect mare asupra rețelei și în calculul redresorului trebuie avută în vedere impedanța rețelei.

Dimensionarea redresorului este influențată în mare măsură de suprasarcinile pe care trebuie să le suporte și de tensiunea redresată necesară. Trebuie avut în vedere că redresorul, spre deosebire de mașinile rotative, nu cuprinde mase mari care să poată acumula energie calorică un timp apreciabil; ca orice dispozitiv de întrerupere sau comutație, dimensiunile sale fizice sînt determinate, în primul rînd, de curentul pe care trebuie să-l poarte și nu de puterea debitată).

După ce s-au determinat dimensiunile transformatorului și ale celorlalte părți ale redresorului, trebuie calculate caracteristicile sau diagramele de funcționare ale instalației: variația cu sarcina de curent continuu a tensiunii redresate, a randamentului, a factorilor de putere, cum și a tensiunii și curenților rețelei de alimentare. S-ar putea să mai intereseze și variația factorului de ondulație sau a pulsației diferitelor armonici ale curentului redresat.

¹⁾ În general, pentru un redresor de anumite dimensiuni fizice, sarcina maximă continuă, exprimată în amperi, este invers proporțională cu rădăcina pătrată a tensiunii medii redresate.

Ca în toate calculele de acest fel, valorile căutate nu se pot obține pe cale directă, ci prin aproximații succesive, deoarece diferitele variabile ale problemei sînt legate între ele. Se apreciază la început, folosind datele acumulate de experiență din acest domeniu, pierderile de putere și căderile de tensiune care sînt de așteptat.

După efectuarea totală sau parțială a calculului, se poate constata dacă performanța redresorului este sau nu satisfăcătoare pentru utilizarea la care este destinat. La nevoie, se reia calculul modificînd datele apreciate inițial.

Alegerea dimensiunilor transformatorului și a reactanțelor sale este limitată de tipurile standardizate.

138. **Calculul transformatorului.** Pentru a găsi tensiunea necesară în secundarul transformatorului, trebuie să se aprecieze căderea de tensiune introdusă de transformator. Se consideră la început că această cădere de tensiune este dată în cea mai mare parte de reactanța de scăpări. Pentru conexiunea în stea hexafazată sau stea în furcă, se poate lua $\Delta U_x = 8 - 10\%$, iar pentru conexiunea dublă-stea cu egalizor de fază, $\Delta U_x = 4 - 6\%$. Aceste valori este probabil că se modifică mult după o primă dimensionare a transformatorului. Pentru a evita un număr prea mare de tatonări, este recomandabil să se aleagă cu grijă valoarea căderii de tensiune, după construcții de transformator cunoscute și de același ordin de mărime.

Avînd valoarea lui ΔU_x , se poate calcula unghiul de suprapunere γ din relația (94.1) sau se poate folosi curba $\frac{\Delta U_x}{U_d} = \sin^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)$ din fig. 193 sau fig. 265.

Cunoscînd unghiul γ , se pot calcula puterile aparente P_1 și P_2 din primarul și secundarul transformatorului, aplicînd formulele date pentru fiecare conexiune în parte. Primarul transformatorului trebuie dimensionat după puterea P_1 , secundarul după puterea P_2 . Puterea de calcul $P_t = \frac{P_1 + P_2}{2}$ servește la alegerea mărării transformatorului.

Aceste puteri se pot calcula și cu ajutorul factorilor de utilizare K' , K'' și $K_t = \frac{K' + K''}{2}$:

$$P_1 = K' \cdot P_d;$$

$$P_2 = K'' \cdot P_d;$$

$$P_t = K_t \cdot P_d.$$

În fig. 264 s-au dat valorile acestor factori de utilizare pentru cîteva conexiuni uzuale.

Tensiunea secundară de fază U_2 se poate calcula din relația (94.1) sau se poate lua după curbele $\frac{U_d}{U_2}$ din fig. 265; aceste curbe sînt calculate după formulele:

$$m = 3: \frac{U_d}{U_2} = \sqrt{2} \cdot 0,827 \cdot \cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right); \quad (138.1)$$

$$m = 6: \frac{U_d}{U_2} = \sqrt{2} \cdot 0,955 \cdot \cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right); \quad (138.2)$$

$$m = 12: \frac{U_d}{U_2} = \sqrt{2} \cdot 0,988 \cdot \cos^2\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (138.3)$$

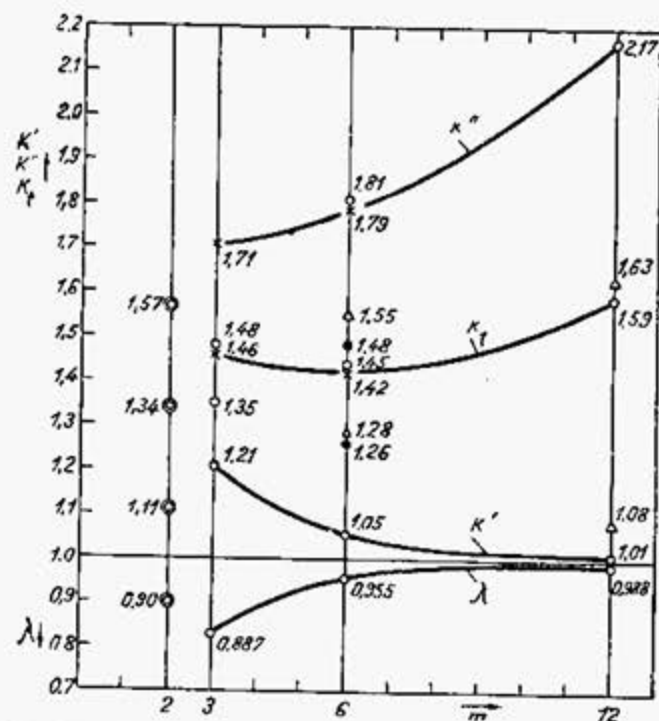


Fig. 264. — Factorii de utilizare K' , K'' , K_I ai transformatorului și factorul de putere în primar, la un redresor fără pierderi, fără reactanțe de scăpări primare sau secundare, cu reactor de netezire infinit. Valorile date în diagrame reprezintă în același timp valorile inițiale ale unui redresor cu reactanțe de scăpări, la mersul în gol; m — numărul de fază sau numărul anozilor redresorului; ○ — redresor bifazat cu bobinajele transformatorului separate; × — transformator în conexiune stea/stea; Δ — transformator în conexiunea triunghi/stea; ○ — transformator în conexiunea stea, respectiv triunghi/stea-zigzag; ● — transformator în conexiunea stea, respectiv triunghi/dublă-stea cu transformator interfază.

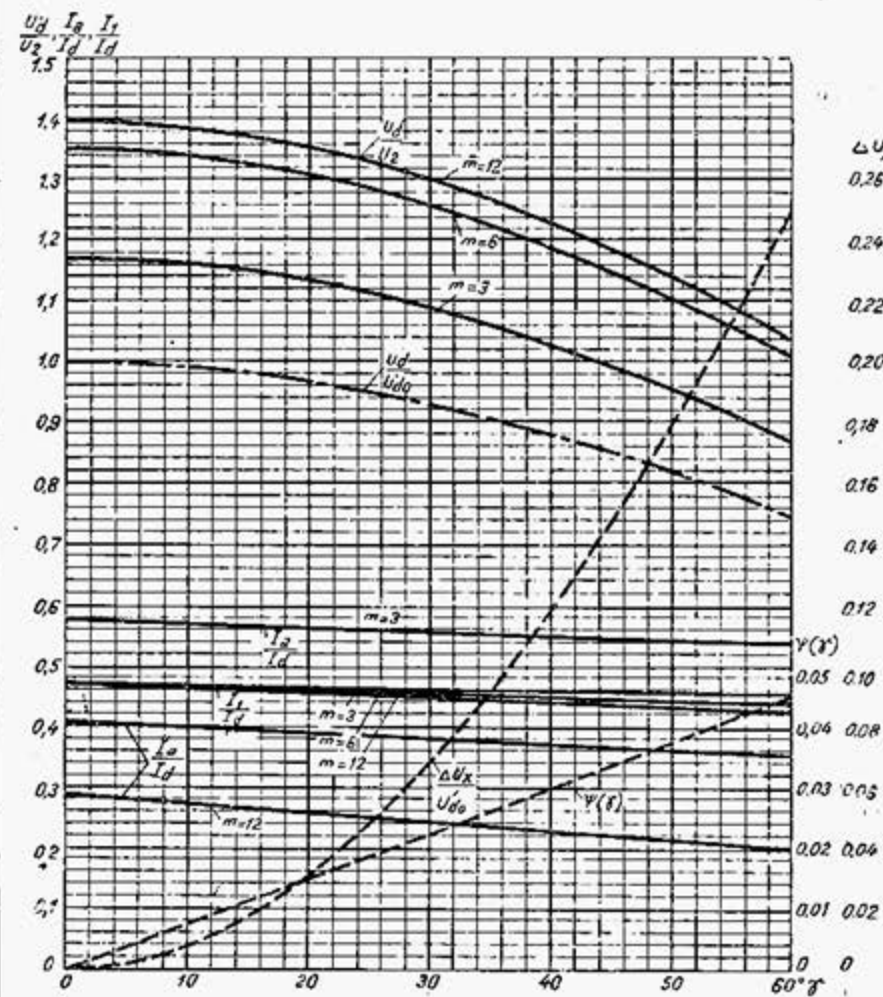


Fig. 265. — Diagrame pentru calculul redresoarelor polifazate.

Valoarea eficace a curentului secundar $I_2 = I_a$ se poate calcula după formulele date la fiecare conexiune sau se poate lua după curbele $\frac{I_a}{I_d}$ din fig. 265.

Valoarea eficace a curentului primar I_1 se poate calcula de asemenea după formulele date la fiecare conexiune sau se poate lua după curbele $\frac{I_1}{I_d}$ din fig. 265; aceste curbe presupun un raport de transformare egal cu unitatea și sînt calculate după formulele:

$$m = 3: \frac{I_1}{I_d} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{1 - \frac{9}{2} \psi(\gamma)}; \quad (138.4)$$

$$m = 6: \frac{I_1}{I_d} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{1 - 3 \psi(\gamma)}; \quad (138.5)$$

$$m = 12: \frac{I_1}{I_d} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{1 - 1,633 \psi(\gamma)}. \quad (138.6)$$

Curenții primari reali se găsesc înmulțind valorile găsite cu $\frac{U_2}{U_1}$.

Cu aceste date se poate face calculul transformatorului. Cunoșcînd dimensiunile transformatorului, se pot calcula reactanțele sale de scăpări sau se pot lua din tabele. Se găsesc de asemenea pierderile în cupru și în fier și curentul de magnetizare.

Se verifică valoarea căderii de tensiune reactive $\Delta U_x = U'_d - U'_{d0}$ cu formula (94.3) și dacă este simțitor diferită de prima valoare de încercare, se rectifică în mod succesiv puterile aparente ale transformatorului și raportul de transformare, reluînd calculul transformatorului, cu o nouă valoare a unghiului γ . În majoritatea cazurilor, această a doua aproximație este suficientă pentru scopuri practice, dar o ultimă verificare este recomandabilă cu a treia valoare a unghiului γ care rezultă din aproximația a doua și calculele se repetă a treia oară.

Dacă se dorește să se țină seamă și de căderea de tensiune introdusă de impedanța rețelei, se calculează o impedanță (reactanță) corespunzătoare căderii de tensiune procentuale n :

$$Z_1 = \frac{\frac{n}{100} U_1}{\sqrt{3} I_1}. \quad (138.7)$$

Curentul de linie I_l este identic cu curentul primar I_1 la conexiunea stea; la conexiunea triunghi I_l nu este însă egal cu $\sqrt{3} I_1$ cum s-a văzut la § 99. Reactanța Z_1 se raportează la secundarul transformatorului cu valoarea $Z = Z_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)$ și se adună la reactanța totală de scăpări a transformatorului.

Cu această reactanță rezultată se calculează tensiunea redresată și tensiunea necesară la transformator.

139. Calculul caracteristicilor redresorului. Pierderile în instalația redresorului provin din căderea de tensiune pe arc, din căderile de tensiune pe rezistențele conductorilor de cupru (pierderile în cuprul transformatorului și alte părți ale instalației) și din pierderile în fierul transformatorului.

Căderea de tensiune pe arc ΔU_a se poate considera constantă, independentă de curentul de sarcină I_d al redresorului. Deoarece acest curent se consideră perfect continuu, datorită reactorului de netezire de reactanță foarte mare, căderea de tensiune ΔU_a nu poate influența decît situația pe partea de curent continuu, nu și relațiile dintre tensiunile și curenții pe partea de curent alternativ a redresorului. Pierderile în cupru și fier introduc o modificare în aceste relații, care este însă destul de mică încît se poate ține seamă de căderea de tensiune introdusă de aceste pierderi, presupunînd aceeași formă de curenți. Singura modificare a formei curenților de o oarecare importanță este aceea introdusă de curenții de magnetizare. Pierderile suplimentare în cupru introduse de acești curenți nu este necesar să fie luate în considerare.

α) *Tensiunea redresată. Caracteristica externă a redresorului* [$U_d = f(I_d)$]. În cazul unui redresor necomandat pe grilă, tensiunea redresată se poate scrie sub forma:

$$U_{d1} = U'_{d0} - \Delta U_a - \Delta U_x - \Delta U_r, \quad (139.1)$$

în care: U'_{d0} este tensiunea medie redresată ideală;

ΔU_a — căderea de tensiune pe arc;

ΔU_x — căderea de tensiune datorită reactanței de scăpări a transformatorului;

ΔU_r — căderea de tensiune datorită pierderilor din cupru.

În cuprinsul acestui capitol s-au mai folosit notațiile:

$$U'_{d0} = U'_d - \Delta U_a; \quad (139.2)$$

$$U_d = U'_{d0} - \Delta U_x; \quad (139.3)$$

$$U'_d = U'_d - \Delta U_x, \quad (139.4)$$

a căror semnificație este evidentă. După cum s-a văzut, curbele din fig. 265 dau tensiunea U'_d dacă se cunoaște tensiunea nominală a unei faze secundare a transformatorului (U_2).

Relația (139.1) se mai poate scrie deci:

$$U_{d1} = U'_d - \Delta U_a - \Delta U_r = U_d - \Delta U_r. \quad (139.5)$$

Dacă pierderile totale în cupru se notează cu P_{Cu} , căderea de tensiune pe partea de curent continuu produsă de aceste pierderi este:

$$\Delta U_r = \frac{P_{Cu}}{I_d}. \quad (139.6)$$

Cu relația (139.6), expresia (139.5) devine:

$$U_{d1} = U'_d - \Delta U_a - \frac{P_{Cu}}{I_d}. \quad (139.7)$$

Căderile de tensiune ΔU_x și ΔU_r sînt proporționale cu curenții de sarcină I_d : din acest motiv, caracteristica externă a redresorului are forma liniară din fig. 266 a. Această formă este valabilă pentru conexiunile care nu lucrează cu egalizatoare de fază. În cazul conexiunii dublă-ștea cu transformator interfază, s-a văzut existența unui curent de sarcină critic I_k , sub care redresorul funcționează cu un unghi de conducție de $\frac{2\pi}{6}$, în loc de $\frac{2\pi}{3}$. Din acest motiv, ca-

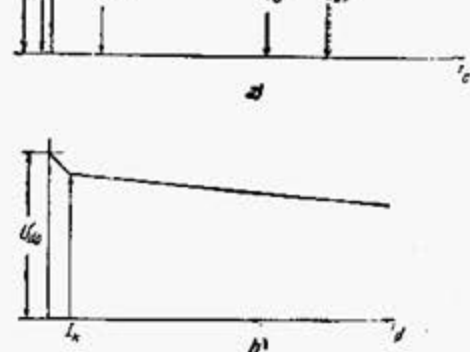


Fig. 266. — Caracteristica externă a unui redresor polifazat: a — fără egalizare de fază; b — cu egalizare de fază.

racteristica externă este formată din două segmente de dreaptă, ca în fig. 266 b; cele două pante diferite provin din căderea de tensiune ΔU_x diferită pentru cele două regimuri de funcționare.

În cazul redresorului comandat pe grilă, caracteristica externă păstrează aceeași pantă, cum s-a demonstrat la § 118, comanda pe grilă influențind practic doar valoarea inițială U_{d0x} (v. fig. 266 a).

În acest caz, în locul expresiilor (139.1) și (139.5) se poate scrie:

$$U_{d0x} = U_{d0x} - \Delta U_a - \Delta U_{rx} - \Delta U_{rx}; \quad (139.8)$$

$$U_{d0x} = U_{d0x} - \Delta U_a - \Delta U_{rx} = U_{dx} - \Delta U_{rx}. \quad (139.9)$$

β) *Puterile reale.* Puterea reală dată pe partea de curent continuu este:

$$P_{d1} = U_{d1} \cdot I_d. \quad (139.10)$$

Puterea reală P_1 absorbită de primarul transformatorului este egală cu puterea redresată ideală $P_d = U_d \cdot I_d$ la care se adaugă pierderile în fier P_{Fe} ale transformatorului și se scad pierderile în cupru din rețea. Dacă rezistența unei faze a rețelei este r (care se apreciază din pierderile în cupru ale rețelei), și curentul de linie este I_l , se poate scrie:

$$P_1 = U_d \cdot I_d + P_{Fe} - 3r I_l^2. \quad (139.11)$$

γ). *Randamentul.* Randamentul redresorului se obține din raportul celor două puteri de mai sus:

$$\eta = \frac{P_{d1}}{P_1} = \frac{U_{d1} \cdot I_d}{U_d \cdot I_d + P_{Fe} - 3r I_l^2}. \quad (139.12)$$

Dacă redresorul folosește tuburi cu catod cald (gazotroane, tiratroane) la numărul expresiei (139.12) ar trebui introdusă puterea cheltuită la încălzirea catodilor, pentru a obține randamentul global al redresorului.

Curba $\eta = f(I_d)$ reprezintă a doua caracteristică de funcționare a redresorului.

δ). *Curentul de linie și curentul primar.* Curentul de linie real al instalației se compune din curentul de linie ideal (corespunzător unui transformator cu curent de magnetizare nul) și curentul de magnetizare al transformatorului. Curentul de linie ideal cuprinde o componentă fundamentală și o serie de armonici superioare. În ipoteza unei tensiuni a rețelei pur sinusoidale, armonicile superioare nu intervin în calculul puterii reale și reactive.

Dacă se notează cu:

I_l — valoarea eficace a curentului de linie;

I_{l1a} — valoarea eficace a componentei active a fundamentalei curentului de linie;

I_{l1r} — valoarea eficace a componentei reactive a fundamentalei curentului de linie;

φ_1 — defazarea dintre fundamentală (I_{l1}) curentului de linie și tensiunea de linie U_l (din gol).

se pot scrie (conform § 124) următoarele relații:

$$\frac{I_{l1r}}{I_{l1a}} = \operatorname{tg} \varphi_1; \quad (139.13)$$

$$\frac{I_{l1a}}{I_l} = \frac{I_{l1}}{I_l} \cos \varphi_1 = \mu \cos \varphi_1 = \lambda \quad (139.14)$$

$$\frac{I_{l1r}}{I_l} = \frac{I_{l1}}{I_l} \sin \varphi_1 = \mu \sin \varphi_1 = \sqrt{1 - \lambda^2}. \quad (139.15)$$

Cu aceste relații, fundamentală curentului de linie este determinată în mărime și fază.

Dacă se introduce componenta deformantă (sau armonică) a curentului de linie (I_{ld}), se pot scrie relațiile:

$$I_l = \sqrt{I_{l1}^2 + I_{ld}^2}; \quad (139.16)$$

$$\frac{I_{ld}^2}{I_l^2} = 1 - \frac{I_{l1}^2}{I_l^2} = 1 - \frac{I_{l1a}^2}{I_l^2} - \frac{I_{l1r}^2}{I_l^2} = \lambda^2 - \lambda^2; \quad (139.17)$$

$$I_{ld} = I_l \sqrt{\lambda^2 - \lambda^2} = I_l \sqrt{1 - \mu^2} = I_l \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\cos \varphi_1}\right)^2}. \quad (139.18)$$

Factorul de putere λ se poate calcula cum s-a arătat la § 129, sau cu aproximație din:

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1} \approx \frac{U_d \cdot I_d}{S_1}, \quad (139.18)$$

în care S_1 este puterea aparentă absorbită în primarul transformatorului. În fig. 264 se poate vedea variația factorului λ cu numărul fazelor.

Factorul de deplasare $\cos \varphi_1$ se poate calcula cu aproximație din:

$$\cos \varphi_1 \approx \frac{U'_d}{U_{d0}} = \cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right). \quad (139.20)$$

Expresii similare cu cele de mai sus se pot scrie pentru curentul din primarul transformatorului.

Pentru a găsi curentul de linie real, trebuie să se adauge curentul I_μ corespunzător curentului de magnetizare al transformatorului. Descompunând acest curent în componenta activă ($I_{\mu a}$) și reactivă ($I_{\mu r}$) se obține:

$$I_l = \sqrt{(I_{la} + I_{\mu a})^2 + (I_{lr} + I_{\mu r})^2 + I_{ld}^2}. \quad (139.21)$$

Curentul primar I_1 este identic cu I_l la o conexiune în stea. La o conexiune în triunghi el este:

$$I_1 = \sqrt{\left(I + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\mu a}\right)^2 + \left(I_r + \frac{1}{\sqrt{3}} I_{\mu r}\right)^2 + I_{ld}^2}. \quad (139.22)$$

140. Exemple de calcul. Redresor pentru tracțiune. Se cer datele de proiectare ale unui redresor hexafazat care trebuie să dea sarcină la plină sarcină 2 000 kW sub 1 500 V și să poată suporta următoarele suprasarcini:

- 25 % timp de 2 h
- 50 % timp de 15 min
- 100 % timp de 15 s
- 200 % în mod instantaneu.

Sursa de alimentare este de 33 000 V—50 Hz. Reactanța transformatorului trebuie să producă o cădere de tensiune de 8 % din tensiunea transformatorului, la curentul de sarcină nominal; pierderile în fier și cupru se vor lua 0,75 % și 1,33 % respectiv. Căderea de tensiune pe arc se presupune constantă și egală cu 25 V.

Mutatorul polianodic. Curentul de sarcină plină este:

$$I_d = \frac{2\,000}{1\,500} \cdot 1\,000 = 1\,333 \text{ A.}$$

Având în vedere că pentru un redresor orice suprasarcină care durează mai mult de o jumătate oră trebuie să se considere ca sarcină continuă, sarcina maximă continuă a redresorului se va lua:

$$1,25 I_d = 1\,667 \text{ A.}$$

Pe de altă parte, mărimea mutatorului se alege de obicei, raportând sarcina la o tensiune redresată de 500 V; atunci așa cum s-a observat la § 137, sarcina maximă continuă a redresorului devine $1\,667 \cdot \sqrt{1\,500/500} = 2\,890 \text{ A}$. În cazul de față mărimea standardizată de mutator cea mai apropiată este de 3 000 A.

Cantitatea de apă de răcire necesară este determinată de energia pierdută în arc, care se transformă în căldură. Aproape toată această căldură este transportată de apa de răcire a mutatorului și numai o foarte mică parte se pierde prin radiație în mediul ambiant. Puterea pierdută în arc la plină sarcină este:

$$P_{arc} = \Delta U_a \cdot I_d = \frac{25 \cdot 1\,333}{1\,000} = 33,3 \text{ kW.}$$

Presupunind o temperatură de 15°C la intrarea apei și o temperatură de 45°C la ieșire, debitul de apă necesar la plină sarcină este:

$$Q = \frac{33,3 \cdot 860}{(45 - 15) \cdot 1\,000} = 0,946 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Transformatorul redresorului. Pentru un redresor hexafazat cu un curent de peste 1 000 A sarcină continuă, se adoptă de obicei o conexiune cu egalizor de fază pentru a reduce la jumătate încărcarea pe un anod. În același timp, factorul de utilizare al unei astfel de conexiuni este mai mare decât la o conexiune simplă hexafazată, cum s-a văzut la § 107.

În cazul de față, se alege conexiunea dublu-trifazată cu un singur egalizor de fază.

Tensiunea redresată ideală, la plină sarcină, este:

$$U'_d = U_{d1} + \Delta U_a + \Delta U_r = 1\,500 + 25 + \frac{1,33 \cdot 2\,000 \cdot 1\,000}{100 \cdot 1\,333} = 1\,545 \text{ V.}$$

Prima aproximație. Din tabela 13 se obține:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1,05 \cdot 1\,545 \cdot 1\,333 = 2\,165 \text{ kVA;} \\ P_2 &= 1,48 \cdot 1\,545 \cdot 1\,333 = 3\,050 \text{ kVA;} \\ P_1^{(1)} &= 1,35 \cdot 1\,545 \cdot 1\,333 = 2\,780 \text{ kVA.} \end{aligned}$$

Tensiunea primară pe fază (valoarea eficace):

$$U_1 = \frac{33\,000}{\sqrt{3}} = 19\,050 \text{ V}$$

Tensiunea secundară pe fază (valoarea eficace):

$$U_2 = 0,855 \cdot 1\,545 = 1\,320 \text{ V.}$$

Raportul de transformare al transformatorului:

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{19\,050}{1\,320} = 14,42.$$

Curentul primar (valoarea eficace):

$$I_1 = \frac{P_1}{3U_1} = \frac{2\,165}{3 \cdot 19\,050} = 38 \text{ A.}$$

Reactanța totală de scăpări, raportată la o fază primară:

$$X_1 = \frac{8}{100} \cdot \frac{U_1}{I_1} = \frac{8}{100} \cdot \frac{19\,050}{38} = 40,15 \Omega.$$

Reactanța totală de scăpări, raportată la o fază secundară:

$$X_2 = \frac{X_1}{n^2} = \frac{40,15}{(14,42)^2} = 0,193 \Omega.$$

¹⁾ Inclusiv puterea aparentă a egalizorului de fază.

Căderea de tensiune produsă de reactanța de scăpări, la plină sarcină:

$$\Delta U_x = U'_{d0} \sin^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{m}{2\pi} \cdot I_d \cdot X_2 = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1\,333}{2} \cdot 0,193 = 61,4 \text{ V}^1).$$

Tensiunea redresată, în gol:

$$U'_{d0} = U'_d + \Delta U_x = 1\,545 + 61,4 = 1\,606,4 \text{ V}.$$

Unghiul de comutație se obține din:

$$\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{U'_d}{U'_{d0}} = \frac{1\,545}{1\,606,4} = 0,9618,$$

din care rezultă:

$$\gamma = 22^\circ 32'.$$

A doua aproximație. La această conexiune, factorul de corecție $\sqrt{1 - m \psi(\gamma)}$ are valoarea:

$$\sqrt{1 - 3\psi(22^\circ 32')} = 0,975.$$

Valorile eficace ale curenților și puterile trebuie reduse cu 25%. Valoarea corectată a puterii ideale debitate de redresor este:

$$P_d = U'_{d0} \cdot I_d = 1\,606,4 \cdot 1\,333 = 2\,120 \text{ kW}$$

și puterile aparente ale transformatorului sînt:

$$P_1 = 0,975 \cdot 1,05 \cdot 2\,120 = 2\,190 \text{ kVA};$$

$$P_2 = 0,975 \cdot 1,48 \cdot 2\,120 = 3\,090 \text{ kVA};$$

$$P_t = 0,975 \cdot 1,35 \cdot 2\,120 = 2\,815 \text{ kVA}.$$

Valoarea nouă a curentului primar este:

$$I_1 = \frac{2\,190}{3 \cdot 19\,050} = 38,37 \text{ A}.$$

Valoarea nouă a tensiunii de fază secundară este:

$$U_2 = 0,855 \cdot 1\,606,4 = 1\,373 \text{ V}.$$

Noul raport de transformare este:

$$n = \frac{19\,050}{1\,373} = 13,87.$$

Reactanța totală de scăpări raportată la secundar devine:

$$X_2 = \frac{8}{100} \cdot \frac{19\,050}{38,4} \cdot \frac{1}{(13,87)^2} = 0,2064 \Omega.$$

Valoarea nouă a căderii de tensiune produsă de reactanță este:

$$\Delta U_x = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1\,333}{2} \cdot 0,2064 = 65,7 \text{ V}.$$

Tensiunea redresată, în gol, devine:

$$U'_{d0} = 1\,545 + 65,7 = 1\,610,7 \text{ V}$$

cu care se obține:

$$\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{1\,610,7}{1\,545} = 0,9592$$

și:

$$\gamma = 23^\circ 18'.$$

Verificarea finală. Cu această nouă valoare a unghiului γ se obține valoarea finală a factorului de corecție:

$$\sqrt{1 - 3\psi(23^\circ 18')} = 0,9745.$$

Repetind calculele se găsește succesiv: $P_d = 2\,148 \text{ kW}$, $P_1 = 2\,200 \text{ kVA}$; $P_2 = 3\,100 \text{ kVA}$; $P_t = 2\,830 \text{ kVA}$; $I_1 = 38,5 \text{ A}$; $U_2 = 1\,377 \text{ V}$; $n = 13,83$; $X_2 = 0,207 \Omega$; $\Delta U_x = 66 \text{ V}$; $U'_{d0} = 1\,611 \text{ V}$; $\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = 0,959$; $\gamma = 23^\circ 20'$.

Această ultimă valoare a lui γ diferă foarte puțin de precedentă și se poate accepta drept valoare finală.

În modul acesta, se obțin următoarele date principale de proiectare:

Curentul anodic (valoare eficace):

$$I_a = 0,9745 \cdot 0,289 \cdot 1\,333 = 375 \text{ A}.$$

Curentul primar (valoare eficace):

$$I_1 = 0,9745 \cdot 0,408 \cdot 1\,333 \cdot \frac{1}{13,83} = 38,5 \text{ A}.$$

Tensiunea de fază secundară (valoare eficace):

$$U_2 = 0,855 \cdot 1\,611 = 1\,377 \text{ V}.$$

Tensiunea de fază primară (valoare eficace):

$$U_1 = 0,577 \cdot 33\,000 = 19\,050 \text{ V}.$$

Puterea aparentă în secundar:

$$P_2 = 0,9745 \cdot 1,48 \cdot 1\,611 \cdot 1\,333 = 3\,100 \text{ kVA}.$$

Puterea aparentă în primar:

$$P_1 = 0,9745 \cdot 1,05 \cdot 1\,611 \cdot 1\,333 = 2\,190 \text{ kVA}.$$

Puterea aparentă medie:

$$P_t = 0,9745 \cdot 1,35 \cdot 1\,611 \cdot 1\,333 = 2\,830 \text{ kVA}.$$

Corecția pentru curentul magnetizant. Componenta reactivă a curentului magnetizant în primar este:

$$I_{\mu r} = 0,05 \cdot 38,5 = 1,92 \text{ A}.$$

Componenta activă, datorită pierderilor în fier, este:

$$I_{\mu a} = 0,0075 \cdot 38,5 = 0,29 \text{ A}.$$

¹⁾ S-a luat un curent prin mutator egal cu jumătate din curentul total de sarcină și un număr de faze egal cu trei, aceasta fiind particularitatea de funcționare a acestei conexiuni (v. § 107).

Factorul de putere este:

$$\lambda = \frac{U_d' \cdot I_d}{S_1} = \frac{1\,545 \cdot 1\,333}{2\,190 \cdot 1\,000} = 0,943.$$

Factorul de deplasare este:

$$\cos \varphi_1 \cong \cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{U_d'}{U_{d0}} = \frac{1\,545}{1\,611} = 0,959,$$

la care corespunde:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,296.$$

Componenta activă a fundamentalei curentului primar:

$$I_{11a} = \lambda \cdot I_1 = 0,943 \cdot 38,5 = 36,28 \text{ A.}$$

Componenta reactivă a fundamentalei curentului primar este:

$$I_{11r} = \lambda \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot I_1 = 0,943 \cdot 0,296 \cdot 38,5 = 10,7 \text{ A.}$$

Componenta deformantă a curentului primar este:

$$I_{1d} = I_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\cos \varphi_1} \right)^2} = 38,5 \sqrt{1 - \left(\frac{0,943}{0,959} \right)^2} = 7,0 \text{ A.}$$

Valoarea eficace corectată a curentului primar este:

$$\begin{aligned} I_1' &= \sqrt{(I_{11a} + I_{11r})^2 + (I_{11r} + I_{1d})^2 + I_{1d}^2} = \\ &= \sqrt{(36,28 + 0,29)^2 + (10,7 + 1,92)^2 + (7,0)^2} = \\ &= \sqrt{1\,337 + 160 + 49} = 39,2 \text{ A,} \end{aligned}$$

adică o valoare cu aproximativ 2,4% mai mare decât valoarea precedentă. Puterea aparentă în primar devine:

$$P_1 = 1,024 \cdot 2\,190 = 2\,240 \text{ kVA,}$$

și puterea medie a transformatorului:

$$P_t = 2\,855 \text{ kVA.}$$

Egalizorul de fază. Egalizorul de fază, considerat ca un transformator interfază monofazat, are o putere nominală:

$$0,083 \cdot 1\,611 \cdot 1\,333 = 180 \text{ kVA.}$$

Fiecare din cele două bobinaje trebuie să poată suporta în mod permanent jumătate din curentul redresat, adică 667 A. Cum s-a arătat la § 106, tensiunea pe egalizor se poate lua jumătate din tensiunea secundară de fază sau aproximativ 690 V. Tensiunea pe un bobinaj este deci 345 V și are o frecvență de 150 Hz.

Curentul magnetizant de frecvență 150 Hz se suprapune peste curentul $\frac{1}{2} I_d$, deci curentul de sarcină critic I_k trebuie să fie egal cu dublul amplitudinii curentului magnetizant. Presupunind $I_k = \frac{0,5}{100} I_d$, valoarea eficace a curentului magne-

tizant din egalizorul de fază are valoarea:

$$I_{\mu 3} = 0,707 \cdot \frac{0,005 \cdot 1\,333}{2} = 2,4 \text{ A.}$$

Reactanța pe bobinaj la frecvența 150 Hz este:

$$X_3 = \frac{690}{2,4} = 290 \Omega.$$

Inductanța pe bobinaj este:

$$L = \frac{X_3}{3\omega} = \frac{290}{3 \cdot 2\pi \cdot 150} = 0,151 \text{ H.}$$

Caracteristicile redresorului. Randamentul la plină sarcină este:

$$\eta = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d' \cdot I_d + P_{Fe}} = \frac{1\,500 \cdot 1\,333}{1\,545 \cdot 1\,333 + 0,0075 \cdot 2\,000 \cdot 1\,000} = \frac{2\,000}{2\,060 + 1} = 0,965.$$

Factorul de putere la plină sarcină se poate lua:

$$\lambda = \frac{I_{11a} + I_{11r}}{I_1} = \frac{36,28 + 0,29}{39,21} = 0,932.$$

Căderea procentuală de tensiune de la sarcina critică $I_k = \frac{0,5}{100} I_d$ la $I_d = 1\,333 \text{ A}$, sau reglajul de tensiune este:

$$\Delta u = 100 \left(1 - \frac{U_{d0}}{U_d} \right) = 100 \cdot \frac{\Delta U_x + \Delta U_r}{U_{d0}} = 100 \cdot \frac{66 + 20}{1\,611 - 25} = \frac{86}{1\,586} = 5,42 \%,$$

Tensiunea redresată în gol este:

$$\frac{1\,377}{0,74} - 25 = 1\,836 \text{ V}$$

adică cu 16 % mai mare decât la sarcina critică $I_k = 7 \text{ A}$.

Principalele date de proiectare, corespunzătoare la diferite sarcini sînt calculate și indicate în tabela 20 cu care s-au trasat curbele caracteristice din fig. 267.

Redresor pentru rețea de lumină și forță. Se cer datele de proiectare pentru un redresor dodecafazat care să furnizeze 600 kW pe firele exterioare ale unui sistem de curent continuu cu trei fire, de 250/500 V. Redresorul trebuie să suporte următoarele suprasarcini:

- 25 % timp de 2 h
- 50 % timp de 15 min
- 100 % timp de 100 s.

Redresorul funcționează în paralel cu un grup rotativ avînd o caracteristică de tensiune compound. Tensiunea rețelei de alimentare este 6 600 V la 50 Hz. Transformatorul redresorului se presupune că are un curent magnetizant de 6%, iar pierderile în cupru și fier sînt 1% și 2% respectiv. Căderea de tensiune pe arc se presupune constantă și egală cu 21 V.

Tabela 20. Performanța redresorului de 2 000 kW pentru tracțiune

Simbolul	Unitatea	1/4 sarcină	2/4 sarcină	3/4 sarcină	4/4 sarcină	5/4 sarcină	6/4 sarcină
I_d	A	333	667	1 000	1 333	1 667	2 000
U_{d0}	V	1 611	1 611	1 611	1 611	1 611	1 611
ΔU_x	V	16,5	33	49,5	66	82,5	99
U_d	V	1 594,5	1 578	1 561,5	1 545	1 528,5	1 512
ΔU_a	V	25	25	25	25	25	25
ΔU_r	V	5	10	15	20	25	30
U_d	V	1 564,5	1 543	1 521,5	1 500	1 478,5	1 457
Δu	%	1,4	2,7	4,1	5,4	6,8	8,1
$U_d I_d$	kW	521,5	1 029	1 521,5	2 000	2 465	2 914
$I_d^2 R_d + I_{Fe}$	kW	546,5	1 065	1 576,5	2 075	2 562,5	3 039
η	%	95,4	96,6	96,7	96,5	96,2	95,9
$\cos(\gamma/2)$	—	0,9897	0,9795	0,9694	0,9490	0,9485	0,9387
γ	—	11°39'	16°27'	20°09'	23°20'	25°14'	28°40'
$\sqrt{1 - \mu^2}$	—	0,9875	0,9815	0,9782	0,9745	0,9715	0,9685
I_a	A	95	189	273	375	468	560
I_1	A	9,7	19,4	28,9	38,5	47,8	57,3
λ_0	%	95,5	95,2	94,6	94,3	93,5	92,7
$\cos \varphi_1$	—	0,990	0,980	0,969	0,959	0,949	0,939
μ_0	—	0,986	0,972	0,976	0,983	0,986	0,989
$\lambda_0 \cos \varphi_1$	%	13,8	19,5	23,9	27,8	31,2	37,8
$\sqrt{1 - \mu_0^2}$	%	20,3	24,5	20,6	18,2	16,8	15,7
I_{11r}	A	9,3	18,5	27,3	36,3	45,0	53,2
I_{11r}	A	1,3	3,8	6,9	10,7	14,9	21,7
I_{1d}	A	2,5	4,7	5,9	7,0	8,1	9,0
I_{1a}	A	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
I_{1r}	A	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
I_1'	A	10,4	20,2	29,6	39,2	49,1	59,2
λ	%	91,8	93,1	93,3	93,2	92,3	90,8

Mutatorul. Curentul debitat la plină sarcină este:

$$I_d = \frac{600 \cdot 1\,000}{500} = 1\,200 \text{ A}$$

iar sarcina maximă continuă se va lua:

$$1,25 \cdot 1\,200 = 1\,500 \text{ A.}$$

Se alege un mutator care să suporte acest curent. Se pot alege de exemplu patru mutatoare de sticlă, fiecare suportând un curent de 375 A.

Puterea disipată într-un tub este atunci:

$$\Delta U_a \cdot I_d = 21 \cdot 300 = 6,3 \text{ kW.}$$

Transformatorul redresorului. Din diferitele conexiuni dodecafazate descrise la § 111–116, conexiunea serie are avantajul că posedă caracteristicile principului de egalizare de fază, fără să producă un salt brusc de tensiune, în regiunea sarcinilor foarte mici. Din acest punct de vedere, această conexiune este oarecum superioară conexiunii cvadro-trifazată, iar puterea aparentă medie a transformatorului este aceeași pentru ambele conexiuni.

În acest caz, se va prefera deci conexiunea dodecafazată serie. Două tuburi redresoare vor fi alimentate de fiecare bobinaj secundar în furcă, astfel încât ramurile exterioare trebuie desfăcute în două, oferind două căi paralele de impedanță apreciabilă pentru curenții preluați de perechile de anodi lucrând în paralel. Valoarea eficientă a curentului anodic la plină sarcină, după relația (116.2), este:

$$I_{a1} = \frac{1}{2} \cdot 0,173 \cdot 1\,200 = 104 \text{ A.}$$

Acest curent poate fi suportat de un tub, chiar dacă se ia în considerare o suprasarcină de 25 % timp de 2 ore.

Tensiunea redresată ideală, la plină sarcină este:

$$U_d = 500 + 21 + \frac{2 \cdot 600 \cdot 1\,000}{100 \cdot 1\,200} = 531 \text{ V.}$$

Deoarece se va utiliza o comandă pe grilă pentru a menține tensiunea constantă la toate sarcinile, se poate admite o cădere de tensiune datorită reactanței ΔU_x destul de mari. Dacă se presupune o cădere de tensiune de 7 % între gol și plină sarcină, tensiunea redresată ideală în gol este:

$$U_{d0} = \frac{531}{0,93} = 571 \text{ V}$$

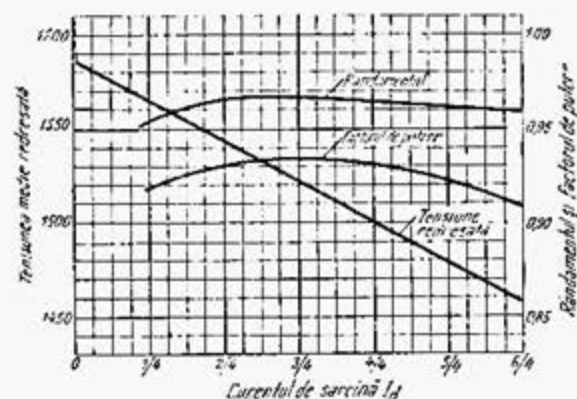


Fig. 267. — Curbele de performanță ale redresorului de 2 000 kW și 1 500 V.

și tensiunea reală în gol este:

$$U_{d0} = 571 - 21 = 550 \text{ V.}$$

Căderea de tensiune datorită reactanței este:

$$\Delta U_x \cong 40 \text{ V.}$$

Deoarece redresorul funcționează după un sistem evadrozafat (conform celor arătate la § 116) și pentru că numai jumătate din curentul de sarcină se comută în fiecare din cele două bobinaje secundare ¹⁾, se poate scrie:

$$\Delta U_x = 40 = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{1200}{2} \cdot X_2.$$

Reactanța de scăpări, raportată la secundar este:

$$X_2 = 0,1047 \Omega.$$

Unghiul de comutație la plină sarcină se găsește din:

$$\cos^2 \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{U_d'}{U_{d0}} = \frac{531}{571} = 0,93.$$

$$\gamma = 30^\circ 41'.$$

Factorul de corecție pentru curenții anodici este:

$$\sqrt{1 - 4 \psi (30^\circ 41')} = 0,955.$$

Deoarece bobinajele interioare sînt utilizate de două ori mai frecvent decît bobinajele exterioare, factorul de corecție pentru curenții secundari este:

$$\sqrt{1 - 2 \psi (30^\circ 41')} = 0,978.$$

Curenții primari au un factor de corecție:

$$\sqrt{1 - k \psi (\gamma)} = \sqrt{1 - \frac{m}{1 - \cos \frac{2\pi}{m}} \psi (\gamma)} = \sqrt{1 - 1,61 \psi (30^\circ 41')} = 0,982.$$

Puterea aparentă totală în primar este:

$$P_1 = 0,982 \cdot 1,03 \cdot 571 \cdot 1200 = 695 \text{ kVA.}$$

Curentul absorbit în primar este:

$$I_1 = \frac{695 \cdot 1000}{1,3 \cdot 6600} = 61 \text{ A.}$$

Tensiunea de fază secundară, după relația (116.1), este:

$$U_2 = 0,785 \cdot 571 = 448,5 \text{ V.}$$

¹⁾ De fapt, curentul de sarcină se divide între cele două transformatoare în raportul $2/\sqrt{3}$ și $\sqrt{3}/2$, în timpul intervalelor succesive de $\frac{1}{12}$ din perioada tensiunii de alimentare. Pentru calcule se poate admite în mod practic că efectele sînt aceleași ca și cum divizarea ar fi simetrică și în raportul 1/1.

Iar tensiunile corespunzătoare pe bobinajele interioare și exterioare sînt:

$$U = U' = 259 \text{ V.}$$

Reactanța de scăpări procentuală a transformatorului este:

$$x = \frac{100}{3} \cdot \frac{P_1 X_2}{(U_2)^2} = \frac{100 \cdot 695 \cdot 0,1047}{3 \cdot (448,5)^2} = 12,6 \text{ } \%.$$

Această valoare relativ mare permite să se utilizeze un tip de bobină concentrice, fără a sacrifica rezistența mecanică necesară pentru a suporta eforturile care apar în timpul unui scurtcircuit produs de un arc invers; totuși, acest detaliu este de mică importanță dacă se folosește o protecție potrivită în serie cu anozii.

Acum se pot deduce principalele date de proiectare.

Curentul anodic (valoarea eficace):

$$I_{a1} = \frac{1}{2} \cdot 0,955 \cdot 0,173 \cdot 1200 = 100 \text{ A.}$$

Curentul secundar (valoarea eficace):

$$I_2 = 0,978 \cdot 0,268 \cdot 1200 = 315 \text{ A.}$$

Tensiunea secundară de fază (valoarea eficace):

$$U_2 = 0,785 \cdot 571 = 448,5 \text{ V.}$$

Tensiunea pe bobinajele interioare și exterioare:

$$U = U' = \frac{U_2}{3} = 259 \text{ V.}$$

Tensiunea pe steaua primară:

$$U_{1st} = \frac{1}{2} \cdot \frac{6600}{1,3} = 1905 \text{ V.}$$

Tensiunea pe triunghiul primar:

$$U_{1tr} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{6600}{1,3} = 3300 \text{ V.}$$

Curentul primar în stea:

$$I_{1st} = 0,983 \cdot 0,438 \cdot 1200 \cdot \frac{448,5}{3810} = 61 \text{ A.}$$

Curentul primar în triunghi:

$$I_{1tr} = 0,983 \cdot 0,253 \cdot 1200 \cdot \frac{448,5}{3810} = 35 \text{ A.}$$

Puterea aparentă totală în secundar:

$$P_2 = 0,983 \cdot 1,67 \cdot 571 \cdot 1200 = 1125 \text{ kVA.}$$

Puterea aparentă în primar:

$$P_1 = 0,983 \cdot 1,03 \cdot 571 \cdot 1200 = 695 \text{ kVA.}$$

Puterea medie a transformatorului:

$$P_t = \frac{1}{2} (695 + 1\,125) = 910 \text{ kVA.}$$

Curentul magnetizant este:

$$I_{\mu r} = 0,06 \cdot 61 = 3,6 \text{ A.}$$

$$I_{\mu a} = 0,01 \cdot 61 = 0,6 \text{ A.}$$

Factorul de putere:

$$\lambda = \frac{531 \cdot 1\,200}{695 \cdot 1\,000} = 0,916.$$

Factorul de deplasare:

$$\cos \varphi_1 = \frac{531}{571} = 0,930; (\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,3952).$$

Factorul de distorsiune:

$$\mu_0 = \frac{0,916}{0,930} = 0,985.$$

Componenta activă a fundamentalei curentului primar:

$$I_{11a} = 0,916 \cdot 61 = 56 \text{ A.}$$

Componenta reactivă a fundamentalei curentului primar:

$$I_{11r} = 0,916 \cdot 0,3952 \cdot 61 = 22 \text{ A.}$$

Componenta deformantă a curentului primar:

$$I_{1d} = 61 \cdot \sqrt{1 - (0,985)^2} = 10,5 \text{ A.}$$

Valoarea eficace corectată a curentului primar:

$$I_1' = \sqrt{(56 + 0,6)^2 + (22 + 3,6)^2 + (10,5)^2} = \sqrt{3\,193 + 655 + 110} = 63 \text{ A.}$$

adică o valoare cu $3\frac{1}{2}\%$ mai mare decât valoarea precedentă. Valoarea finală a puterii aparente în primar este:

$$P_1 = 1,035 \cdot 695 = 725 \text{ kVA,}$$

iar puterea medie a transformatorului devine:

$$P_t = 925 \text{ kVA.}$$

Caracteristicile redresorului. Randamentul la plină sarcină este:

$$\eta = \frac{600}{(531 \cdot 1,2) + (0,01 \cdot 600)} = \frac{600}{637 + 6} = 0,934.$$

Factorul de putere la plină sarcină este:

$$\lambda = \frac{56 + 0,6}{63} = 0,9.$$

Variația procentuală de tensiune, care trebuie anulată prin reglajul pe grilă, este:

$$\frac{550 - 500}{550} = \frac{50}{550} = 9\%.$$

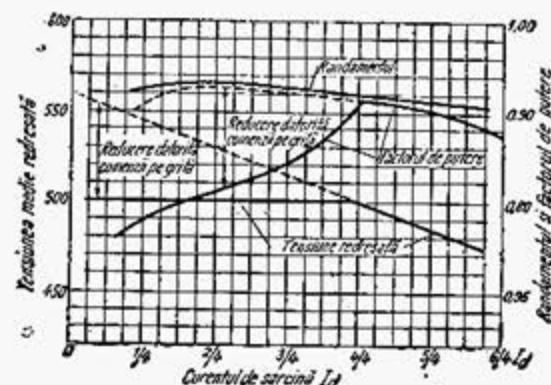


Fig. 268. - Curbele de performanță ale redresorului de 600 kW și 500 V.

Unghiul de comandă în gol, adică unghiul cu care trebuie întârziată comutația pentru a reduce tensiunea redresată de la 550 V la 500 V este:

$$\cos \alpha = \frac{U_d}{U_{d0} - \Delta U_a} = \frac{500}{550} = 0,909.$$

din care se obține:

$$\alpha = 24^\circ 38'.$$

Factorul de putere, în cazul comenzii pe grilă, se poate lua aproximativ:

$$\lambda = \mu_0 \cdot \cos(\alpha + \varphi),$$

deoarece efectul întârzierii comutației este de a reduce factorul de putere. În gol, deci, neglijând curentul magnetizant, factorul de putere este $\mu_0 \cos \alpha$ în loc de μ_0 .

Tabela 21 cuprinde principalele date de proiectare, după care s-au trasat curbele din fig. 268.

M. Exploatarea redresoarelor

141. **Aprinderile inverse.** a) *Fenomenul.* În timpul funcționării normale a redresoarelor, un anod oarecare debitează atât timp cât potențialul său este superior potențialului celorlalți anodi.

Tensiunea inversă sau negativă care apare între un anod în stare de neconducție și arcul din mutator este egală cu suma tensiunii redresate și valoarea instantanee a tensiunii secundare a transformatorului anodic. Valoarea maximă a acestei tensiuni este aproximativ dublul amplitudinii tensiunii de fază. În condiții neprielnice, care se vor vedea mai departe, această tensiune poate declanșa un arc în sens opus, ceea ce dă naștere fenomenului cunoscut de aprindere inversă.

Tabela 21. Performanța redresorului de 600 kW pentru rețea de linie și forță

Simbol	Unitatea	1 sarcină	2 sarcină	3 sarcină	4 sarcină	5 sarcină	6 sarcină
I_d	A	300	600	900	1 200	1 500	1 800
U_{d0}	V	580	580	580	571	580	580
ΔU_x	V	10	20,5	31	41	51	61,5
U_d	V	570	559,5	549	531	529	518,5
ΔU_a	V	21	21	21	21	21	21
ΔU_r	V	4,5	9	13,5	18	22,5	27
U_d	V	544,5	529,5	514,5	500	485,5	470,5
$U_d \cdot I_d$	kW	164	318	463	600	728	847
$U_d \cdot I_d + P_{Fe}$	kW	177	342	500	653	800	932
η	%	92,4	93,2	92,6	91,9	91,2	90,8
$\cos^2(\gamma/2)$	—	0,9928	0,9647	0,9466	0,9296	0,9123	0,8940
γ	—	15° 3'	21° 40'	26° 43'	30° 41'	34° 28'	38° 0'
$V1 - 1,61 \psi(\gamma)$	—	0,9918	0,9880	0,9852	0,9830	0,9808	0,9788
I_a	A	15,5	30,9	46,3	61	76,7	92,0
λ_a	%	96,5	95,2	93,4	91,6	90,3	88,2
$\cos \varphi_1$	—	0,982	0,965	0,947	0,930	0,912	0,894
μ_a	—	0,962	0,984	0,986	0,985	0,990	0,992
$\cos \alpha$	—	0,919	0,944	0,972	1 000	1 000	1 000
α	—	25° 17'	19° 14'	13° 12'	0	0	0
$\mu \sin(\varphi_1 + \alpha)$	%	54,8	55,8	52,2	36,4	40,6	44,4
$V1 - \mu_a^2$	%	19,0	17,9	16,8	15,4	14,2	12,6
I_{u0}	A	15,0	29,4	43,3	56	69,1	80,2
I_{ur}	A	8,5	17,3	23,1	22	31,1	40,8
I_{d0}	A	3,0	5,5	7,8	10,5	10,9	11,6
$I_{\mu a}$	A	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$I_{\mu r}$	A	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
I_1	A	20,0	37,1	52,1	63,5	77,3	92,4
λ	%	78,0	81,1	84,2	91,2	90,2	87,5

În timpul unei aprinderi inverse, anodul care conduce în sens invers devine sediul unei pete catodice, astfel încât apare un curent care curge de la majoritatea celorlalți anodi spre anodul care conduce invers (de exemplu anodul 1 în fig. 269).

În afară de arcul normal care pornește de la catod și atinge succesiv toți anozii, se stabilește un alt arc perturbator care poate produce deteriorarea mutatorului.

Arclul perturbator leagă anodul, care a devenit sursă de emisiune de electroni, cu anodul care are potențialul cel mai ridicat. Astfel, în cazul din figură se va stabili succesiv un arc între anozii 1 și 2, 1 și 3, 1 și 4 etc.

Cînd cauza care a făcut ca anodul 1 să devină o sursă de electroni încetează, arcul parazit se stinge de îndată ce anodul 1 revine la potențialul cel mai ridicat și funcționarea mutatorului se normalizează.

De cele mai multe ori, însă, o aprindere inversă la un anod creează condiții neprielnice de funcționare a redresoarelor, și anume o ionizare puternică și o ridicare a presiunii vaporilor de mercur. Areste consecințe ale aprinderii inverse pot deveni la rîndul lor, o cauză pentru noi aprinderi inverse și la ceilalți anodi, astfel că fenomenul are tendința de a se amplifica.

Prin fenomenul aprinderii inverse stabilindu-se un arc direct între doi sau mai mulți anodi, se produce un scurtcircuit la bornele transformatorului. Impedanța circuitului fiind compusă numai din impedanța de scurtcircuit a transformatorului și rezistența arcului, care sînt amîndouă foarte mici, curentul debitat este foarte mare, întrecînd de mai multe ori curentul nominal. Aprinderea inversă constituie un scurtcircuit, atât pentru rețeaua de curent alternativ, cît și pentru rețeaua de curent continuu, atunci cînd pe aceasta din urmă debitează și alte generatoare de curent continuu.

În rezumat, un mutator, în condiții normale de funcționare permite circulația energiei numai într-un sens. Din anumite cauze, efectul de supapă poate înceta iar curentul circule de la catod la anodi și de la un anod la altul. Acestui fenomen de aprindere inversă îi corespunde un scurtcircuit net al celor două rețele.

Aprinderile inverse constituie un accident grav. Anozii se volatilizează, de asemenea și tecile ce înconjoară anozii cum și grilele. Metalul se depune pe izolatoare și intră în glazura izolatoarelor. Cu timpul, izolatoarele devin neutilizabile.

Aprinderile inverse constituie dificultatea principală în dezvoltarea mutatoarelor de tensiune și curent mare și în majoritatea aplicațiilor este factorul care limitează puterea nominală a mutatorului.

3) Cauzele aprinderilor inverse. Deși se știe că aprinderile inverse trebuie să fie însoțite de formarea unei pete catodice pe un anod, nu se cunoaște totuși mecanismul exact al fenomenelor care au loc. După unele din teorii, atunci cînd un anod devine negativ în raport cu catodul și conducția normală încetează, norul de ioni pozitivi care rămîne în primele momente în apropierea sa este atras către

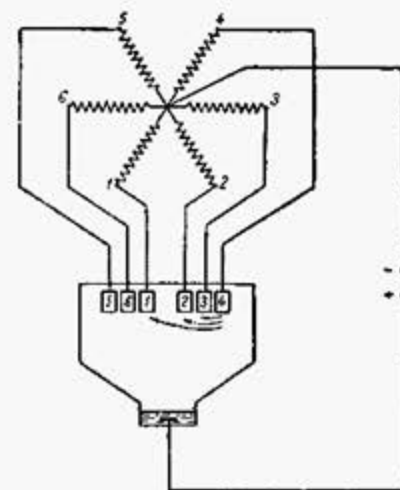


Fig. 269. — Formarea arcului invers într-un mutator polianodic.

anod și contribuie la formarea unei noi pete catodice. Dacă aceasta ar fi singura cauză, ar trebui ca toate aprinderile inverse să se întâmple în mod necesar în primele momente după încetarea unei perioade de conducție normală, deoarece ionii se deplasează repede spre suprafețele solide ale redresorului și rămân prea puțini în momentele mai târzii ale perioadei de neconducție. S-au observat însă aprinderi inverse chiar și la aceste momente mai târzii, în care este imposibil să existe o concentrație mare de ioni pozitivi. Din acest motiv se consideră că prezența ionilor pozitivi nu este singura cauză a aprinderilor inverse.

Cercetările făcute au stabilit numeroase cauze auxiliare ale aprinderilor inverse. Ele sînt:

- supratensiuni provenite din rețeaua primară;
- supratensiuni provocate de însuși mutatorul, atunci cînd este încărcat brusc în stare rece;
- o încălzire exagerată a anozilor, provocată de o suprasarcină sau de un defect al instalației de răcire;
- o ionizare puternică a vaporilor de mercur provocată de funcționarea în suprasarcină;
- depuneri de picături de mercur pe anod;
- ivirea de asperități pe suprafața anozilor în urma aprinderilor inverse care au avut loc anterior;
- depunere de pulbere pe anodi sau pe izolatoare;
- densitatea prea ridicată a vaporilor de mercur;
- densitatea prea mare a gazelor din mutator, provenite fie din cauza neetanșeității mutatorului, fie din cauza unei degajări a gazelor care au rămas absorbite de anodi și care nu au fost extrase suficient prin operația de formare;
- acțiunea razelor ultraviolete din arc asupra anozilor în cazul cînd nu s-au luat măsuri suficiente de ecranare sau cînd tecile de protecție a anozilor s-au deteriorat și deplasat.

De cele mai multe ori, mai multe din cauzele enumerate contribuie la stabilirea fenomenului.

γ) *Mijloacele de combatere a aprinderilor inverse.* O parte din mijloacele de combatere depind de modul în care se face exploatarea. Astfel, trebuie să existe grija de a nu se pierde vidul, pentru ca formarea să fie completă la punerea în funcțiune a mutatorului și de a nu-l încălca cînd este rece.

Alte mijloace depind de construcția mutatorului. Un progres însemnat a fost realizat prin introducerea grilelor. Aceste grile sînt așezate în interiorul tecii care înfășoară anozii și sînt montate izolat. Ele produc o defonizare a spațiului din jurul anozilor. Pe de altă parte, ele devin foarte calde în timpul serviciului și temperatura lor este cu atât mai ridicată, cu cît sarcina mutatorului este mai mare. Prin căldura radiată care este degajată de grile, se menține o temperatură ridicată a vaporilor de mercur din teaca anozilor și se reduce densitatea vaporilor de mercur, eliminînd astfel una din cauzele aprinderilor inverse.

Pentru că aprinderile inverse nu se pot evita, a fost necesar să se găsească posibilitatea de a se reduce efectele grave, prin stingerea rapidă a arcului invers. Introducerea grilelor a adus soluția în această problemă.

Dispozitivul este asemănător celui reprezentat în fig. 270 și se compune din: o sursă auxiliară de curent continuu: baterie, convertizor rotativ sau redresor auxiliar, care dă tuturor grilelor un potențial pozitiv față de catod. În cazul unei aprinderi inverse, care reprezintă, după cum s-a arătat, un scurtcircuit la bornele transformatorului, intensitatea în primarul transformatorului devine foarte mare. Un releu acționat de transformatoarele de intensitate montate pe circuitul de alimentare a transformatorului schimbă polaritatea grilelor care devin negative față de catod. Anozii care nu sînt în funcțiune nu se mai pot aprinde, deoarece

electronii emiși de catod sînt respinși de grile. Ei nu mai pot atinge anodul dacă tensiunea de negativare este destul de mare și dacă grila este destul de deasă. Anozii care debitează se sting în mod normal cînd potențialul lor devine negativ. În timp de maximum o perioadă se sting așadar arcurile tuturor anozilor și redresorul este scos din funcțiune destul de repede pentru ca acțiunea distrugătoare a arcului invers să nu provoace deteriorări grave.

Supratensiunea în primarul transformatorului dispărînd, releul de comandă a grilelor polarizate schimbă polaritatea grilelor care devin din nou pozitive și mutatorul poate să funcționeze din nou. Dispozitivul descris mai sus apără redresorul nu numai de aprinderi inverse, dar și de suprasarcini anormale.

142. Funcționarea în paralel. După cum s-a arătat, căderea de tensiune într-un redresor se compune din căderea de tensiune la suprafața catodului, din căderea de tensiune la suprafața anozilor, cum și din căderea de tensiune în arc.

Forma curbei, arătînd căderea de tensiune în funcție de sarcină, descreește la început, trece printr-un minim și apoi crește.

În prima parte a caracteristicii, pe așa-numita porțiune negativă a caracteristicii, funcționarea în paralel a două redresoare este imposibilă. Adică, dacă prin același transformator se alimentează două redresoare, conectînd anozii și catodii în paralel, unul singur din aceste redresoare va lua toată sarcina și celălalt nimic.

Pentru a se asigura funcționarea în paralel, trebuie în acest caz să se adauge în circuitul anozilor reactanțe sau rezistențe pentru a se produce o cădere de tensiune suplimentară care să facă posibilă funcționarea în paralel.

Funcționarea în paralel însă a grupurilor de transformatoare și redresoare împreună nu prezintă nici o dificultate din cauza căderii de tensiune în transformatoare.

Funcționarea redresoarelor în paralel cu convertizoare rotative se poate face în condiții bune numai dacă căderile de tensiune ale mutatoarelor împreună cu transformatoarele sînt apropiate de căderile de tensiune ale grupurilor rotative.

143. Formarea redresoarelor. Operația de formare a redresoarelor constă în extragerea gazelor care sînt absorbite de organele interne ale mutatorului. Un redresor la care s-a extras prin ajutorul pompei de vid preliminar și al pompei moleculare aproape tot aerul, în cuvă rămînînd presiunea prescrisă de cel mult 10/1 000 mm col. Hg este înapt totuși pentru funcționare dacă nu se extrag și gazele absorbite de părțile metalice ale redresorului, în special de anodi.

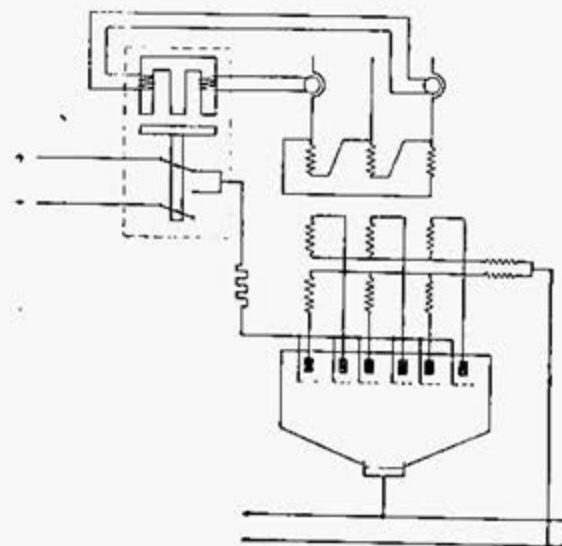


Fig. 270. — Dispozitiv de protecție contra arcurilor inverse, prin comanda pe grile.

Atunci cind redresorul începe să funcționeze cu sarcină mare, gazele absorbite se degajă, fenomen care se poate observa cu aparatul de măsurat vidul. Un vid insuficient este, după cum s-a constatat, una din cauzele care determină aprinderile inverse, accident grav care poate aduce deteriorarea mutatorului.

Cantitatea de gaze absorbite de metale este foarte mare. Se menționează cazul oțelului care poate absorbi o cantitate de gaze, socotită la presiunea atmosferică, egală cu de 16 ori volumul său.

Dacă într-un redresor a intrat aer dintr-o cauză oarecare, însă numai pentru scurt timp, cantitatea de gaze absorbită de părțile metalice este proporțională cu durata pierderii vidului, de unde rezultă interesul de a reduce la minimum timpul în care se deschide cuva redresorului.

Formarea redresoarelor se face provocind degajarea gazelor prin încălzirea părților metalice care au absorbit aceste gaze. Prin funcționarea normală a redresorului, anozii în primul rând, apoi și celelalte părți metalice ale cuvei se încălzesc și o parte din gazele absorbite se degajă. Se obține astfel un fel de formare normală.

Dacă un redresor după ce a fost demontat este pus în funcțiune cu o formare insuficientă, degajarea gazelor se face încet cu încetul în timpul funcționării și el poate fi încărcat la sarcini din ce în ce mai mari. După o funcționare de mai multe zile, formarea se desăvârșește și el poate fi încărcat la sarcina maximă.

Acest fel de a proceda nu este însă recomandabil din cauza incertitudinii asupra gradului de formare atins, și este arătat aci numai pentru a se atrage atenția că la începutul funcționării este necesar să nu se încarce redresorul la plină sarcină.

Se va descrie cum decurge operația de formare obișnuită, care se face în mai multe etape.

După ce s-a făcut un vid în mutator sub 5/1 000 mm col. Hg cu ajutorul pompelor de vid se pune să debiteze un singur anod, desfășurând conexiunile la ceilalți anozii.

Curentul este reglat printr-o rezistență de formare care se poate improviza din bare de fier lat. Conexiunile se fac prin cleme mecanice spre a se putea varia cu ușurință lungimea de bară prin care trece curentul și deci și rezistența. Formarea se face de obicei la o tensiune mult mai scăzută față de cea normală, prin utilizare de prize speciale la transformatoare sau prin conectarea în serie cu transformatorul principal a unui alt transformator coborât, aceasta pentru a nu se cheltui în mod inutil energie.

Intensitatea la începutul formării se reglează la 1/10 pînă la 1/5 din intensitatea normală a anodului.

Se urmărește cu atenție aparatul de măsurat vidul și se observă că pe măsură ce se face formarea, adică se degajă gazele absorbite, presiunea din mutator crește. Cind presiunea ajunge la 10/1 000 mm col. Hg, se întrerupe formarea și se continuă a se face vidul mai departe pînă cind presiunea scade sub 5/1 000 mm col. Hg.

Se repetă operația de mai multe ori pînă cind anodul poate debita timp îndelungat, fără ca presiunea să crească.

Se modifică curentul debitat de anod, micșorînd rezistența și se repetă operația descrisă mai sus pentru diferite valori ale curentului, de exemplu: de 1/2, 3/4, 4/4 și intensitatea normală de suprasarcină prescrisă.

Formarea se termină punînd să funcționeze deodată cîte doi anozii alăturați, apoi cîte trei anozii alăturați și așa mai departe pînă cind toți anozii debitează și vidul se menține la valoarea prescrisă timp îndelungat, fără tendința de scădere.

144. Producerea de supratensiuni la funcționarea cu redresorul rece. Supratensiuni foarte importante de ordinul a cîteva zeci de mii de volți se pot produce între catod și anozii, dacă se încarcă redresorul în stare rece dincolo de o anumită limită.

Fenomenul apare cind densitatea vaporilor de mercur este foarte mică, ceea ce se întîmplă imediat după punerea în funcțiune a redresorului înainte de a fi avut timpul să se încălzească.

Rezistența arcului este, în acest caz, foarte mare. În apropiere de anozii, unde secțiunea arcului electric este minimă, se ivește situația următoare:

Moleculele de vaporii de mercur sînt lovite de curentul de electrozi și disociate în mare proporție. Dacă curentul debitat trece de o anumită valoare, majoritatea moleculelor sînt disociate în ioni care sînt atrași către catod. Se ivește o lipsă locală de molecule de vaporii de mercur adică o depresiune. Drept consecință, căderea de tensiune în arc se mărește și curentul se micșorează pînă cind alte molecule de mercur sosesc din împrejurimi pentru a restabili presiunea. Ia naștere un fenomen oscilatoriu care se repetă cu o frecvență de cîteva zeci de mii de perioade pe secundă.

Dacă se încarcă deci redresorul cu un curent superior celui care poate fi transmis prin arc, redresorul nu va debita decît curentul limitat, însă va funcționa ca un generator de înaltă frecvență.

Tensiunea oscilațiilor produse este de cîteva zeci de mii de volți și poate provoca conturnarea și distrugerea izolatoarelor de la anozii și catod.

Pe de altă parte, oscilațiile se transmit prin inducție la anozii care sînt stinși și din cauza presiunii mari se produc aprinderi inverse. Redresorul este supus astfel la două fenomene deosebite care amîndouă pot provoca avarii grave.

145. Indicații de serviciu. Înainte de punerea în funcțiune, se va controla buna stare a tuturor mecanismelor și dispozitivelor: relee, instalații de pompe de vid, dispozitive de răcire, instalații de semnalizare etc.

La punerea în funcțiune, presiunea din redresor trebuie să fie aceea indicată de fabricant, în genere 1—5 torr. La o presiune de 10 torr, funcționarea trebuie oprită deoarece se mărește considerabil pericolul aprinderilor inverse. Pentru a avea presiunea prescrisă, se impune de multe ori ca pompele de vid să funcționeze înainte de a se pune redresorul în funcțiune.

Operația de punere în funcțiune se face în modul următor: se pun laii în funcțiune pompele de vid pînă cind se atinge presiunea de regim prescrisă.

Se pune apoi în funcțiune dispozitivul de răcire prin punerea în funcțiune a pompelor și ventilatoarelor și prin manevrarea robinetelor respective.

Se pune apoi în funcțiune dispozitivul de aprindere și excitație. Se controlează debitul anozilor de excitație prin citirea ampermetrului respectiv.

Se închide întreruptorul de curent alternativ. Prin această operație, arcu se stabilește la anozii principali și apare tensiunea redresată. Se controlează prin citirea voltmetrului de curent continuu existența unei tensiuni normale a mutatorului.

Constructorii livrează de obicei instalații la care punerea sub tensiune a redresorului se face concomitent cu aprinderea și excitația.

O dată anozii principali aprinși, ei sînt puși să debiteze și pentru aceasta se anclanșează întreruptorul de curent continuu al mutatorului. Dacă există alte mutatoare care debitează pe barele stației, prin manevra aceasta mutatoarele au fost puse în paralel.

Trebuie să se dea atenție faptului că tensiunea de mers în gol a mutatoarelor este cu 10—15 % mai mare decît atunci cind mutatorul debitează (după cum s-a arătat la descrierea bobinelor de absorbție).

Anclanșarea întreruptorului de curent continuu trebuie să se facă imediat după aprinderea anozilor, spre a nu lăsa mutatorul să funcționeze în gol timp îndelungat.

În timpul funcționării se va controla presiunea și se va opri mutatorul dacă această presiune trece de limita indicată (10 torr).

Temperatura plăcii anozilor trebuie să fie de maximum 60°C. Dacă temperatura are tendința de a crește, se vor lua măsurile în consecință. O temperatură prea joasă a mutatoarelor nu este de dorit din cauza pericolului de a se produce supratensiuni, după cum s-a arătat mai înainte.

Din această cauză se recomandă să nu se încarce mutatorul la plină sarcină îndată ce el a fost pus în funcțiune, ci trebuie să se aștepte pînă cînd placa anozilor se încălzește pînă la 50°C.

Pentru scoaterea din funcțiune a redresorului se declanșează mai întîi întrerupătorul de curent continuu și apoi acela de curent alternativ. Se scoate apoi din funcțiune instalația de răcire și se pot opri și pompele de vid dacă presiunea este sub 5 torr.

146. Indicații de întreținere. Măsuri privind siguranța personalului. În instalațiile la care polul pozitiv este conectat cu instalația și polul negativ cu pămîntul, cum este de obicei la substațiile de tramvaie, cuva mutatorului împreună cu toate piesele în directă legătură galvanică sînt puse sub tensiune.

Nu se poate face nici o lucrare care comportă atingerea mutatorului sau a conductelor care sînt în legătură cu el mai înainte de a scoate instalația de sub tensiune.

Nu este îngăduit de a se desface redresoarele decît după ce s-au răcit, deoarece vaporii de mercur sînt toxici și periclitează sănătatea personalului. În substațiile cu redresoare trebuie să se ia măsuri speciale de ventilație a sălii.

Controlul garniturilor. Dacă garniturile sînt de mercur, controlul se face examinînd nivelul, urmărindu-se dacă a scăzut. În acest caz se mai string pîlile și se completează mercurul care lipsește. Operația se face în timp ce redresorul mai este în stare caldă. Nu este permis să se întrecă nivelul de mercur prescris, fiind pericol ca mercurul să iasă afară și să provoace un scurtcircuit.

Dacă garniturile sînt de cauciuc sau de plumb, se va controla dacă pîlile de stringere nu s-au slăbit.

Controlul pompelor de vid. La pompa statică se va controla dacă se asigură debitul de apă de răcire prescris. La pompa rotativă se va controla nivelul uleiului.

Controlul instalației de răcire. Se va controla dacă conductele de apă de răcire nu sînt infundate cu săruri sau nămol.

N. Redresoare uscate

a) Proprietăți generale

147. Generalități. În redresoarele uscate (sau redresoarele metalice sau cu semiconductori), transformarea curentului alternativ în curent continuu pulsatoriu este obținută pe baza conducerii unidirectionale a curentului prin contactul între un semiconductor și un metal. Tipurile de redresoare uscate care se bucură la această dată de o mare răspîndire sînt acelea cunoscute sub numele de: redresoare cu cupru și oxid cupros, redresoare cu seleniu și redresoare cu magneziu și sulfură cuprică. La toate acestea, efectul de redresare este obținut la contactul între semiconductorul în formă de disc sau pătură subțire depusă pe un suport anumit și un disc metalic care, cîteodată, este denumit «contraelectrod». Astfel de redresoare se întrebunțază în electrotehnică, mai ales în instalațiile de alimentare în curent continuu și în schemele instrumentelor de măsurată cu cadru mobil pentru curenți alternativi. O altă categorie de redresoare, care a căpătat în ultimii ani aplicații extrem de interesante, o formează redresoarele numite cu cristal,

cele mai cunoscute fiind acelea cu germaniu și acelea cu siliciu. Contactul redresant se obține aici cu ajutorul unui virf metalic foarte subțire. În momentul de față, aceste redresoare sînt întrebunțate în deosebi în tehnica hiperfrecvențelor radioelectrice și despre ele nu va fi vorba în cele ce urmează.

148. Realizarea tipurilor industriale de redresoare uscate. Deși redresoarele de același tip au, în general, o construcție analogă, metodele tehnologice întrebunțate de diferite fabrici pot fi întrucîtva deosebite, ceea ce conduce cîteodată și la o comportare diferită a acestor redresoare. Este posibil totuși să se indice o schemă generală a tehnologiei de fabricație pentru fiecare tip de redresor uscat în parte. Trebuie de subliniat însă de la început că o foarte mare parte dintre cunoștințele acumulate pînă acum în această direcție au fost obținute pe cale empirică și că motivele pentru care anumite procedee tehnologice trebuie să fie conduse într-un anumit fel și nu în altul nu pot fi totdeauna pe deplin justificate.

a) **Redresoare cu oxid cupros.** Din tablă de cupru electrolitic (puritatea cel puțin 99,95% și lipsit complet de urme de argint) se confecționează discuri cu grosimea de 1,3 mm și diametrul de 41 mm (fabricația sovietică) care se curăță cu grijă pe cale chimică. Aceste discuri sînt introduse apoi într-un cuptor, la temperatura de 1 000 pînă la 1 030°C. pentru a se obține formarea, pe o față, a unui strat subțire (film) de oxid cupros (Cu_2O). În acest timp, cealaltă față a fiecărui disc este protejată contra oxidării. Experiența a arătat că rezultate bune nu sînt obținute decît dacă aerul din cuptor este menținut foarte curat: un conținut cît de mic de sulf, fosfor sau halogeni este în special vătămător, cauzînd o creștere importantă a rezistenței redresorului în sensul conducerii curentului (sensul direct). Alte impurități micșorează aderența între stratul de oxid și placa de bază.

Cînd grosimea filmului de oxid a atins 0,1 mm, ceea ce se întîmplă de obicei după 10–12 min, discurile se mută într-un alt cuptor a cărui temperatură se menține între 450 și 600°C. După ce discurile au atins această temperatură (este nevoie de 5–7 min), ele sînt scoase din cuptor și răcite pînă la temperatura camerei, prin cufundarea în apă curgătoare sau în ulei. S-a constatat că o viteză de răcire mare contribuie la scăderea rezistenței redresorului în sensul direct.

În timpul ultimelor două tratamente termice, filmul de oxid cupros roșu se acoperă cu o pătură de oxid cupric (CuO) cenușie, cu proprietăți izolante. Această pătură trebuie îndepărtată prin procedee mecanice sau chimice, avînd grijă să nu fie atacat și stratul inferior de oxid cupros. La sfîrșit, discurile se spală cu îngrijire și se usucă.

În ultimii ani s-au dezvoltat și alte procedee de fabricație a discurilor. Unele dintre acestea recomandă ca discurile să fie menținute mult timp în vid la temperatură înaltă, înainte de a se începe procesul de oxidare descris mai înainte. Acest tratament are ca efect o creștere a tensiunii inverse a redresorului și o scădere substanțială a rezistenței în sensul direct.

Discul de cupru oxidat trebuie pus apoi în contact cu contraelectrodul de care s-a vorbit mai înainte (fig. 271). Pentru a se asigura un contact bun, fața oxidată a discului este mai întîi acoperită cu un strat de argint coloidal (aquadag), prin pensulare, sau cu un film de argint, aur sau aluminiu, depusă prin evaporarea în vid a acestor substanțe, sau — în sfîrșit — prin pulverizare de substanțe cu punct de topire coborît, ca staniu, cadmiu, plumb. Peste acest strat se presează un disc de plumb. Contactele electrice se iau de la discurile extreme de cupru și plumb,



Fig. 271. — Secțiune printr-un element redresor cu oxid cupros:
1 — oxid cupros; 2 — placă de bază; 3 — contraelectrod.

iar sensul de conducție al curentului este de la contraelectrod la cupru. Fenomenul de redresare apare la locul de contact între discul și filmul de oxid cupros.

În toate cazurile, elementele redresoare cu cuproxid se assemblează în coloane compuse din mai multe elemente pentru a se obține tensiuni sau curenți de lucru mai mari sau pentru alte scopuri. Pentru aceasta, elementele sînt prevăzute de la început cu orificii centrale prin care se introduce o tijă izolantă. Elementele se așază pe această tijă, de cele mai multe ori distanțate unele de altele

cu ajutorul unor șaibe de distanțare, creîndu-se astfel posibilitatea unei evacuări mai ușoare a căldurii. Tot pentru o bună ventilație se prevăd și șaibe de cupru cu diametru mare, după cum se vede în fig. 272. Contactul între discurile de cupru și de plumb este asigurat cu ajutorul piulițelor de la capetele tijei centrale care se strîng pînă cînd apăsarea atinge 500 kgf. Pentru a se asigura protecția contra acțiunii corosive a agenților ex-

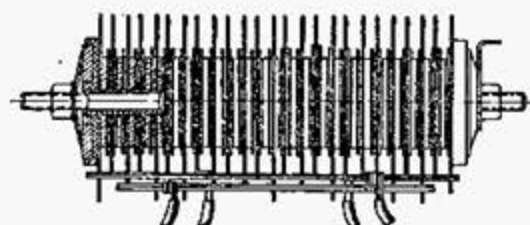


Fig. 272. — O coloană de elemente redresoare cu oxid cupros.

terni, întreaga coloană se acoperă apoi cu un strat de lac izolator și din de punct de vedere electric. Contactele electrice se iau, de obicei, de la șaibele ventilație.

β) Redresoarele cu seleniu. Prepararea elementelor redresoare cu seleniu este mai complicată și diferă, adesea foarte mult, de la o întreprindere constructoare la alta. În linii generale, metodele de fabricație mai răspîndite decurg în următoarele etape:

Prepararea seleniului. Seleniul comercial se sublimază în vid de cîteva ori pentru a fi purificat de metale grele. Se atacă apoi cu acid azotic și, din soluția obținută, se cristalizează bioxidul de seleniu în forma alotropică roșie. În urmă, bioxidul de seleniu este dizolvat în apă și redus în seleniu pur cu ajutorul unui curent de bioxid de sulf sau cu hidroxilamină¹⁾.

Seleniul pur are însă o rezistivitate prea mare pentru a putea fi întrebuințat la fabricarea redresoarelor. Aceasta scade însă în mod substanțial, dacă în seleniu se adaugă anumite impurități, de obicei halogenii: clor, brom sau iod. Aceste adaosuri sînt foarte mici; de exemplu, iodul se introduce în proporție de 0,001 %. După omogeneizarea amestecului prin topire, acesta este turnat pe o placă de marmură, unde se solidifică sub forma unor fulgi subțiri care sînt apoi fin pulverizați.

Aplicarea stratului de seleniu pe suport. Ca suport se întrebuințează o placă de oțel, de obicei nichelată, care se sablează pentru a ușura aderența stratului de seleniu. În ultimul timp se întrebuințează și suporti de aluminiu care, pe lângă o greutate mai mică, au o căldură specifică și o conducibilitate termică mai mare decît a oțelului, ceea ce este avantajos pentru tratamentul termic care urmează. În plus, aluminiul prezintă o rezistență mai mare la coroziune. Pentru a se asigura aderența seleniului, suportul de aluminiu este întâi sablat și apoi acoperit cu o pătură subțire de bismut sau, după un alt procedeu, este întâi atacat cu apă tare și apoi nichelat.

De asemenea, există mai multe metode pentru aplicarea stratului de seleniu pe suport. Astfel, pulberea de seleniu, obținută cum s-a arătat mai sus, se presară

¹⁾ Hidroxilamina este preferabilă bioxidului de sulf, pentru că prezintă — eventuală — a sulfului în seleniu, are un efect nefavorabil asupra proprietăților electrice ale redresoarelor.

pe suport, se topește și apoi se presează; de asemenea se poate întinde pe suport seleniu topit; în sfîrșit, seleniul poate fi depus pe suport prin evaporarea în vid. Ultima metodă se dovedește a fi cea mai recomandabilă prin aceea că grosimea stratului poate fi variată în limite largi. Astfel, în acest caz, se obțin straturi omogene a căror grosime nu depășește 0,01 mm. De mare importanță pentru caracteristicile redresorului este și temperatura la care se menține suportul în timpul depunerii stratului de seleniu. Deși se atrage atenția totdeauna asupra acestui amănunt,



Fig. 273. — Secțiune printr-un element redresor cu seleniu:
1 — seleniu; 2 — placă de bază; 3 — contraelectrod.



Fig. 274. — Element redresor cu seleniu, avînd șaiba de contact aplicată peste contraelectrod.

în literatură se găsesc puține date privind valorile cele mai potrivite ale temperaturii.

Cristalizarea seleniului. Seleniul depus pe suport în acest mod se află în stare amorfă. Pentru a putea îndeplini funcțiunile care îi sînt rezervate în redresor, el trebuie cristalizat într-una din variațiile alotropice cristaline, și anume în varietatea denumită β. În acest scop, discul acoperit cu stratul de seleniu amorf este încălzit în aer liber pînă în vecinătatea punctului de topire (217°C). Dacă acest tratament se face, de exemplu, la temperatura de 215°C, el nu trebuie să dureze mai mult de cîteva minute. Durata tratamentului crește odată cu coborîrea temperaturii. Se întrebuințează și alte metode pentru cristalizarea seleniului.

Aplicarea contraelectrodului. Ca material pentru contraelectrod se întrebuințează diverse aliaje cu punct de topire coborît, din staniu, bismut, cadmiu și, cîteodată, plumb. S-a constatat că mici adaosuri de alte metale, de exemplu taliu, îmbunătățesc caracteristicile redresorului. Aliajul se depune pe stratul de seleniu mai ales prin pulverizare în aer.

Fig. 273 reprezintă o secțiune printr-un element redresor cu seleniu. Sensul de conducție al curentului este de la placa de bază spre contraelectrod. Fenomenul de redresare apare la contactul între seleniu și contraelectrod.

Montarea elementelor redresoare în coloane. Asamblarea elementelor redresoare în coloane se face ca și la redresoarele cu oxid cupros, cu deosebire că contactul electric cu contraelectrodul se obține cu ajutorul unei șaibe arcuite care ferește de distrugere contraelectrodul fragil la strîngerea coloanei cu ajutorul piulițelor de la capete (fig. 274).

Formarea redresorului constituie operația finală prin care se îmbunătățesc caracteristicile electrice ale elementelor care, după parcurgerea etapelor descrise mai sus, nu sînt încă satisfăcătoare (îndeosebi, rezistența, în sensul de conducție al curentului este prea mică și prezintă variații mari de la un element la altul). Operația se reduce la a trece un curent intens în sensul neconductor; atît durata, cît și intensitatea curentului diferă de la o rețetă la alta. S-a constatat însă că dacă se întrebuințează o ventilație suficientă — astfel ca temperatura să nu depășească 70°C —, se obține totdeauna o rezistență inversă ridicată și constantă în timp. O scurtare a duratei tratamentului este favorizată de prezența urmelor de taliu în materialul contraelectrodului.

7) Redresoarele cu magneziu și sulfură de cupru s-au dezvoltat după 1930 și sînt încă puțin răspîndite. Fig. 275 reprezintă o secțiune printr-un asemenea element redresor.

Pe un disc de magneziu 1, impurificat cu puțin mangan și care formează suportul elementului, se depune un strat semiconductor 2, a cărui compoziție diferă de la un mod de fabricație la altul. La redresoarele de acest tip fabricate

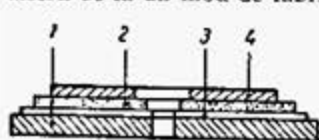


Fig. 275. - Secțiune printr-un element redresor cu magneziu și sulfură de cupru;

1 - placă de bază; 2 - sulfură de cupru; 3 - strat semiconductor; 4 - contraelectrod.

Ca și în cazul precedent, elementul redresor cu magneziu și sulfură de cupru trebuie format înainte de a putea fi întrebuințat. Operația se execută de obicei în curent alternativ sub o tensiune de câțiva volți, aplicîndu-se concomitent și o presiune de ordinul a 1000 de kilograme. Procesul de formare conduce la sudarea în mai multe puncte a tabletei de sulfură de cupru la placa de bază de magneziu. Redresarea este strict limitată la aceste puncte, iar sensul de conducție al curentului este de la contraelectrod spre placa de bază.

149. Caracteristicile redresoarelor uscate. În exploatare, intervin următoarele caracteristici electrice ale redresoarelor uscate: caracteristica curent-tensiune, caracteristicile: rezistența și capacitatea proprie în funcție de tensiune. Toate aceste caracteristici depind atât de tipul redresorului, cît și de condițiile de exploatare (temperatură, frecvența curentului ce se redresează, tensiunea de lucru etc); de asemenea, într-un regim de exploatare normală (în curent alternativ), caracteristicile prezintă variații în timp, pe cînd prin aplicarea de lungă durată a unei tensiuni constante, ele se deformează în mod continuu. În plus, chiar pentru același tip de redresor, caracteristicile pot varia în funcție de procedul tehnologic utilizat la confecționare. Totuși, poate fi descris un mod destul de general de comportare a tuturor redresoarelor de același tip.

a) **Caracteristica curent-tensiune.** Cu toate că în exploatare intervine caracteristica curent-tensiune în curent alternativ, aceeași caracteristică ridicată în curent continuu oferă totuși multe indicații asupra comportării reale a redresorului. Fig. 276 și fig. 277 reproduc asemenea caracteristici pentru un redresor cu Cu_2O și pentru un redresor cu seleniu, ridicate la aceeași temperatură ($+20^\circ\text{C}$).

Se observă în ambele cazuri că pentru tensiuni reduse curenții inversi (corespunzători sensului neconductor al redresorului) sînt cu cîteva ordine de mărime mai mici decît curenții direcți (corespunzători sensului de conducție), iar pentru tensiuni mai mari, ei cresc în mod destul de apreciabil. Pentru aceeași tensiune inversă, curentul respectiv este însă mai mare la redresoarele cu oxid cupros decît la redresoarele cu seleniu. De asemenea se observă că porțiunea rectilinie a curbei, prelungită spre axa absciselor, întîlnește această axă mai aproape de origine în cazul redresoarelor cu oxid cupros decît în cazul redresoarelor cu seleniu. Acesta este motivul pentru care cele din urmă sînt aproape exclusiv întrebuințate în instrumentele de măsură cu redresoare uscate, pentru că o caracteristică curent-tensiune ca aceea a redresoarelor cu seleniu ar obliga cu grația

instrumentului să fie foarte înghesuită la începutul scalei instrumentului. Fig. 278 reprezintă caracteristica curent-tensiune a unui redresor cu sulfură de cupru. De remarcat că această curbă este mai puțin caracteristică pentru exploatarea redresoarelor cu sulfură de cupru, întrucît în curent alternativ, datorită unui puternic efect de histererezis, curentul este apare mai important.

Este evident că un redresor cu semiconductor este cu atît mai bun, cu cît

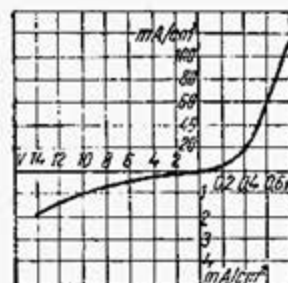


Fig. 276. - Caracteristica curent-tensiune a unui redresor cu Cu_2O .

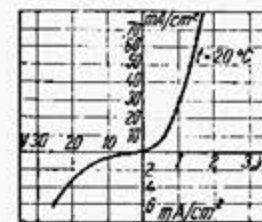


Fig. 277. - Caracteristica curent-tensiune a unui redresor cu seleniu.

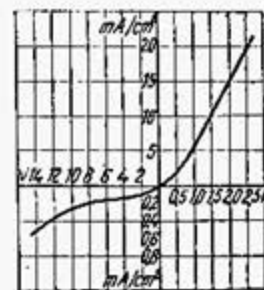


Fig. 278. - Caracteristica curent-tensiune a unui redresor cu magneziu și sulfură de cupru.

curentul invers este mai mic și cu cît curentul direct crește mai repede în funcție de tensiune. În mod convențional, această proprietate se exprimă prin raportul:

$$K = \frac{U_{in}}{U_{dn}} \quad (149.1)$$

denumit **factor de redresare**, unde

U_{in} reprezintă tensiunea inversă la o densitate de curent invers $J_{in} = 1 \text{ mA/cm}^2$ pentru redresoarele cu oxid cupros și $J_{in} = 4 \text{ mA/cm}^2$ pentru redresoarele cu seleniu;

U_{dn} este tensiunea directă corespunzătoare unei densități a curentului direct $J_{dn} = 50 \text{ mA/cm}^2$ pentru ambele tipuri de redresoare.

Pentru redresoarele cu sulfură de cupru, factorul K nu a fost deocamdată definit, acestea nefiind intrate încă în practica curentă.

β) **Caracteristica: $R = f(U)$.** Deși nici această caracteristică a redresoarelor cu semiconductor nu are o aplicație practică directă, ea oferă totuși un mod de apreciere a calității redresoarelor. Forma generală a unei astfel de caracteristici (rezistența definită ca în curent continuu, prin raportul U/J în funcție de tensiunea U) este arătată în fig. 279. Ea poate diferi după tipul redresorului, dar — de obicei — rezistența descrește foarte repede în sensul de conducție a curentului pînă cînd, pentru tensiuni mai mari, devine aproape constantă. Pentru curenți inversi, rezistența crește pînă la o valoare maximă, după care descrește pînă la valori comparabile cu acelea ce se întîlnesc în sensul de conducție. De remarcat că rezistența minimă nu se

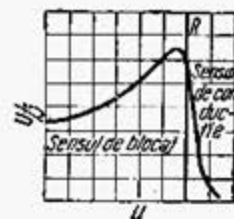


Fig. 279. - Forma generală a caracteristicii: $R = f(U)$ pentru un redresor cu semiconductor.

obține pentru $U = 0$, ci pentru o anumită tensiune inversă, cuprinsă de obicei între 0,1 și 4 V.

Calitatea redresorului poate fi apreciată evident și pe această cale, cu ajutorul relației:

$$K' = \frac{U_{in}}{J_{in} A} : \frac{U_{dn}}{J_{dn} A} = \frac{U_{in}}{U_{dn}} \cdot \frac{J_{dn}}{J_{in}}, \quad (149.2)$$

unde A reprezintă aria suprafeței utile a redresorului.

γ) *Capacitatea proprie.* Efectul capacității proprii a redresorului apare totdeauna când acesta este utilizat în curent alternativ la frecvență înaltă și se datorește în esență existenței stratului care bazează trecerea curentului într-unul din sensuri (așa-numitul «strat de baraj» despre care va fi vorba mai jos). Capacitatea proprie a redresoarelor cu semiconductori este de ordinul

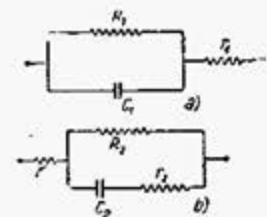


Fig. 280. — Circuite de curent alternativ echivalente unei celule redresoare.

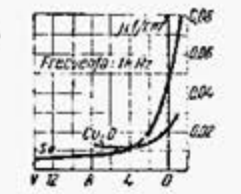


Fig. 281. — Caracteristica capacității proprii-tensiune, pentru tensiuni continue.

te efective ale celulei redresoare (rezistența și reactanța în serie) la diferite frecvențe, măsurările fiind făcute la suprapunerea unei tensiuni alternative mici peste o tensiune continuă, constantă.

Modelul cel mai simplu de reprezentare a circuitului echivalent unei celule este arătat în fig. 280a, unde C_1 reprezintă capacitatea proprie, R_1 este rezistența care măsoară conductibilitatea stratului de baraj iar r_1 pe aceea a semiconductorului. În această schemă R_1 va varia cu tensiunea continuă aplicată (fig. 279), dar r_1 ur trebui să rămână constantă. Măsurările au arătat că și r_1 variază cu tensiunea continuă, ceea ce a condus ca schema din fig. 280a să fie înlocuită cu aceea din fig. 280b, echivalentă din punct de vedere electric. Aici σ reprezintă rezistența semiconductorului, de valoare mică și constantă, iar R_2 și r_2 pot varia cu tensiunea continuă aplicată. Identificând impedanțele celor două scheme, se găsesc următoarele relații de corespondență, în ipoteza că σ este neglijabil:

$$C_2 = \frac{C_1}{\left(1 + \frac{r_2}{R_1}\right)^2} \quad (149.3) \quad R_2 = \frac{R_1}{1 + \frac{r_2}{R_1}} \quad (149.4) \quad r_2 = \frac{r_1}{1 + \frac{r_2}{R_1}} \quad (149.5)$$

De aici rezultă că tensiunea continuă exercită o influență mare asupra capacității proprii a redresorului; este tocmai ceea ce se vede din curba experimentală din fig. 281, atât la redresoarele cu oxid cupros cât și la cele cu seleniu. Aceasta arată că la aceste redresoare capacitatea proprie crește pe măsură ce se trece de la tensiuni inverse ridicate spre tensiuni directe.

150. *Factorii care influențează caracteristicile redresoarelor uscate.*
α) *Influența timpului.* Timpul modifică caracteristicile redresoarelor, câteodată în

mod substanțial. De altfel curbele reproduse în fig. 276—279 reprezintă numai caracteristici instantanee ale redresoarelor; ele au fost ridicate aplicând tensiunea doar atât timp cât este necesar pentru a se face citirea indicațiilor instrumentelor de măsură. Aceste modificări pot fi reversibile și ireversibile, deși această împărțire nu este perfect rigidă, neputându-se vorbi aproape niciodată de o asemenea modificare ca fiind complet reversibilă sau complet ireversibilă.

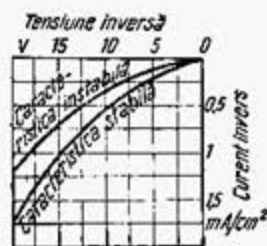


Fig. 282. — Alunecarea curentului la un redresor cu oxid cupros.

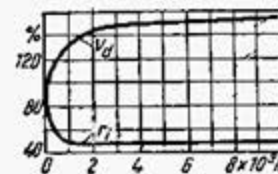


Fig. 283. — Variația în timp a rezistențelor directe și inverse la redresoarele cu oxid cupros.

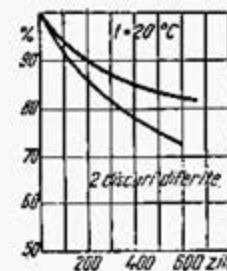


Fig. 284. — Variația în timp a tensiunii de ieșire la două redresoare cu seleniu, la o tensiune de intrare constantă (redresorul debitează pe o sarcină oarecare).

Modificările reversibile, cunoscute și sub numele de alunecarea curentului, apar deosebit de clar la redresoarele cu oxid cupros, pentru tensiuni inverse. Fig. 282 reprezintă, la un astfel de redresor, atât caracteristica instantanee cât și caracteristica stabilă, aceasta din urmă fiind obținută după ce fiecare tensiune inversă a fost aplicată timp de câteva ore. După îndepărtarea tensiunii aplicate, începe un proces de revenire, care se termină după același interval de timp, când rezistența redresorului revine la valoarea instantanee inițială. Fenomenul rămâne mereu reproductibil, exact în aceleași condiții, pentru același redresor.

În timp ce la redresoarele cu oxid cupros fenomenul nu se observă decât pentru curenții inversi, la redresoarele cu seleniu, alunecarea curentului invers este însoțită și de modificarea rezistenței în sensul de trecere al curentului care nu este complet reversibilă. Mai mult decât atât, modificările caracteristicilor inverse sînt aici mai complicate, observîndu-se alunecări în ambele sensuri.

Deși datele din literatură nu sînt încă complete, se pare că redresoarele cu sulfura de cupru se comportă în același mod. Aici se observă însă o alunecare mai importantă a curentului direct.

O dată cu alunecarea curentului invers, se observă și o alunecare a capacității proprii a redresorului. În general, scăderea rezistenței inverse este însoțită de creșterea capacității proprii.

Modificările ireversibile ale caracteristicilor curent-tensiune poartă numele de *îmbătrînire*. În general, îmbătrînirea se manifestă prin creșterea rezistenței directe și prin scăderea rezistenței inverse, ambele avînd ca efect o scădere a calității redresorului. Fig. 283 reprezintă acest fenomen pentru redresoarele cu oxid cupros iar fig. 284, sub o altă formă, pentru redresoarele cu seleniu. După cum se vede, variațiile rezistenței sînt, în nmele cazuri, mai rapide la început, apoi mai lente, și tind spre o valoare constantă care se atinge — în unele cazuri — după un timp destul de lung (după mai mulți ani). Acest timp de îmbătrînire depinde de mai mulți factor, printre care sarcina maximă sub care

funcționează redresorul și temperatura; dacă elementele redresoare se află câteva zile la o temperatură ambiantă mai ridicată (50–80°C) sau dacă sînt supraîncălzite, timpul de îmbătrînire scade considerabil.

β) *Influența temperaturii.* Creșterea temperaturii conduce la creșterea atât a curentului direct cît și a curentului invers, dacă tensiunile aplicate rămîn constante. Fenomenul este reversibil dacă se lucrează cu variații mici de temperatură. La

temperaturi mai înalte sau mai joase apar schimbări în structura redresorului, ceea ce îl face să devină de neîntrebuințat. Oricum, variațiile caracteristicii curent-tensiune sub influența tem-

peraturii au forme foarte diferite de la un tip de redresor la altul; de aceea ele nu pot fi descrise cantitativ. Fig. 285 reprezintă aceste variații pentru un redresor cu oxid cupros.

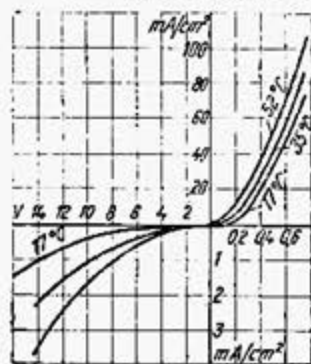


Fig. 285. — Caracteristica curent-tensiune a unui redresor cu oxid cupros, la temperaturi diferite.



Fig. 286. — a) Variația tensiunii de ieșire a unui circuit redresor în funcție de frecvență. b) Circuitul utilizat la ridicarea curbilor.



versă, curentul respectiv începe să crească foarte repede pînă la valori de scurtcircuit, ceea ce denotă că redresorul este străpuns. Valoarea tensiunii de străpungere depinde de tipul redresorului precum și de regimul de lucru. Astfel, pentru elementele cu seleniu, străpungerea are loc pentru tensiuni cuprinse între 50 și 80 V, pentru elementele cu oxid cupros, între 20 și 70 V, iar pentru elementele cu sulfură de cupru, între 8 și 10 V. Aceste date sînt valabile într-un regim de funcționare normal. Dacă însă redresorul lucrează în regim de impulsuri, tensiunea de străpungere poate atinge 100 V. Tensiunile de lucru se aleg de 2–3 ori mai mici decît tensiunile de străpungere, cu excepția regimului de impulsuri, unde tensiunile de lucru pot fi apropiate mult de tensiunile de străpungere.

δ) *Influența frecvenței.* Existența capacității proprii a redresorului și fenomenul de alunecare a curentului fac ca relația dintre curent și tensiune să fie alta în curent alternativ decît în curent continuu. Astfel, fig. 286a arată modul în care variază tensiunea redresată la ieșirea unui circuit redresor, ca acela reprezentat în fig. 286b, în funcție de frecvență, cînd tensiunea de alimentare este menținută constantă. Se vede că creșterea frecvenței are un efect cu atât mai puternic cu cît tensiunile de alimentare sînt mai mici. Această influență a frecvenței poate fi explicată cu ajutorul curbelor din fig. 281, care arată că atunci cînd redresorul este supus la tensiuni inverse capacitatea este mai mică decît cînd este supus la tensiuni directe. În ambele situații, această capacitate C este șuntată de o rezistență R ; ansamblul formează o impedanță a cărei expresie este dată de:

$$Z = \frac{R}{1 + R^2 C^2 \omega^2} - j \frac{R^2 C \omega}{1 + R^2 C^2 \omega^2} \quad (150.1)$$

În semiperioada în care redresorul i se aplică tensiuni directe, rezistența R este mai mică, iar capacitatea C , fiind mare, impedanța redresorului nu limitează

curentul în mod sensibil. În schimb, în semiperioada în care redresorul i se aplică tensiuni inverse, R este foarte mare și cum C scade, curentul devine puternic capacitiv, cu atât mai mult cu cît frecvența este mai ridicată. În acest mod o parte din curent este sustrasă redresării și tensiunea continuă la ieșirea circuitului de redresare va scădea.

Cu fenomenul de alunecare a curentului situația este evident inversă: a frecvențe mai înalte el dispare.

b) Teoria redresoarelor uscate

151. *Fenomene fundamentale.* S-a spus mai înainte că în redresoarele uscate conducția asimetrică a curentului electric se datorește unor fenomene care apar la suprafața de contact dintre doi conductori diferiți. Acesta este un fapt dovedit experimental. S-a arătat că la redresoarele cu oxid cupros, redresarea curentului apare la contactul dintre placa de bază și stratul de oxid cupros, la redresoarele cu seleniu intervine contactul între contraelectrod și stratul de seleniu, iar la redresoarele cu sulfură de cupru, redresarea se pune pe seama contactelor punctuale între placa de magneziu și pastila de sulfură de cupru. În fiecare caz, unul dintre conductorii în contact are o conductivitate mult mai redusă decît a celuilalt: ultimul este un metal, iar primul un semiconductor. După concepțiile actuale, fenomenul de redresare se datorește modului diferit în care are loc conducția curentului electric în conductorii și în semiconductorii.

152. *Conducția electrică în solide* Spre deosebire de starea gazoasă unde particulele constitutive, — atomii sau moleculele — sînt relativ foarte distanțate între ele, în starea solidă, atomii sau ionii constitutive sînt foarte apropiați și distribuiți regulat, formînd rețele cristaline¹⁾. De aici rezultă deosebiri esențiale între unele dintre proprietățile caracteristice ale celor două categorii de corpuri. Pe cînd fiecare atom sau moleculă de gaz își ține strîns legați electronii proprii care se găsesc în anumite stări de energie (nivele), în număr destul de limitat, atomii sau ionii dintr-un cristal liberează — din cauza mării lor apropieri — unii din electronii lor pînă într-atît încît aceștia nu mai aparțin unor atomi dați, ci cristalului întreg. Aceasta se datorește — practic vorbind — suprapunerii în cristal a nivelelor de energie corespunzătoare electronilor mai slabi legați (electronii de valență) de la toți atomii. Într-o reprezentare mai riguroasă, trebuie ținut seama că și acestor electroni „liberi” din cristal le sînt afectate anumite nivele de energie, însă aceste nivele sînt atît de îngheșuite, încît nu este nevoie de un consum important de energie pentru ca electronii să treacă de pe un nivel pe altul, după cum este cazul la atomii unui gaz. Se ajunge astfel la așa numitele benzi de energie electronice despre care se poate spune — cel puțin într-o primă aproximație — că ele corespund cîte una fiecărui nivel de energie din atomii sau ionii liberi care intră în constituția cristalului. Cum nivelele atomilor liberi sînt separate prin zone largi unde nu există stări pe care electronii să le poată ocupa, rezultă că benzile electronice ale atomilor legați din cristal sînt și ele separate prin zone de energie interzise pentru aceiași electroni. Trecerea electronilor dintr-o bandă inferioară într-o bandă superioară nu se poate face deci decît printr-un singur salt și numai dacă aceștia primesc din exterior o cantitate de energie egală cel puțin cu distanța în energie între cele două benzi. Această schemă energetică a cristalului este reprezentată în fig. 287. După cum se vede, nivelele de energie

¹⁾ Rețelele cristaline pot fi formate fie din atomi neutri din punct de vedere electric (rețele homopolare) fie din ioni, adică din atomi cărora le lipsește unul sau mai mulți electroni de valență sau, din contra, au unul în plus (rețele heteropolare). Numai ultimul caz se întâlnește la semiconductorii de care se ocupă acest capitol.

inferioară sînt proprii fiecărui atom și numai nivelele superioare se multiplică în benzi comune tuturor atomilor.

Pe de altă parte, distribuția regulată a ionilor în rețea conduce la apariția unui câmp electrostatic periodic. Considerații de mecanică cuantică — pe care de altfel se bazează întregul mecanism al conducerii electrice în solide — arată însă că efectul acestui câmp electrostatic periodic asupra electronilor de mare

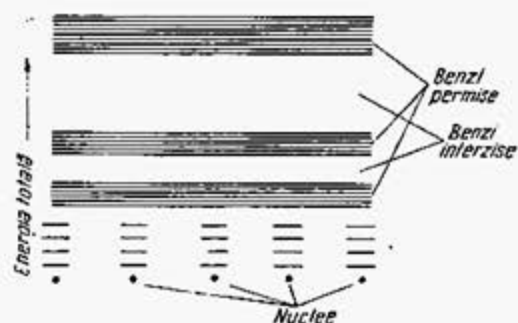


Fig. 287. — Schema energetică a electronilor unei rețele cristaline.

se aplică din exterior un câmp electric: electronii capătă, după Lorenz, viteze ordonate în direcția corespunzătoare câmpului electric aplicat care se suprapun peste vitezele agitației termice. Această componentă ordonată a mișcării electronilor este asimilată cu cea ce se numește curentul electric.

În realitate, această explicație simplă este necompletă. În conformitate cu ideile fundamentale expuse mai sus, accelerarea electronilor cu ajutorul câmpului electric conduce la mutarea acestora de pe nivelele de energie inițiale pe altele superioare. Ori, după un foarte bine cunoscut principiu al mecanicii cuantice, este imposibil ca mai mult decât doi electroni să ocupe simultan un anumit nivel de energie (principiul lui Pauli). Urmează de aici că singurii electroni care pot fi accelerați sînt acei care se află într-o bandă de energie incomplet ocupată, întrucît trecerea electronilor dintr-o bandă completă într-alta incomplet ocupată este practic exclusă din cauza distanței mari (în energie) care le separă. O asemenea situație, favorabilă pentru conducția electrică, nu se întâlnește decât la metale, corpuri prin excelență bune conducătoare de electricitate. Din contră, la corpurile solide izolatoare, benzile de energie inferioare sînt, în mod normal, complet ocupate de electroni, pe cînd banda sau benzile superioare sînt complet goale. Cele două regiuni sînt separate printr-o zonă largă cu nivele de energie interzise pentru electroni.

În sfîrșit, trebuie să mai adăugăm pentru completare că distribuția energiei electronilor în benzile de conducție din metale nu se supune — așa cum credea Lorenz — legii clasice date de Boltzmann și valabilă în cazul agitației termice a moleculelor unui gaz. Dacă $\Delta n(w)$ reprezintă numărul de electroni pe centimetru cub a căror energie este cuprinsă între w și $w + \Delta w$ la temperatura absolută T , legea lui Boltzmann se scrie:

$$\Delta n(w) = A w^{1/2} e^{-\frac{w}{KT}} dw, \quad (152.1)$$

unde K este constanta lui Boltzmann.

De aici rezultă că la $T = 0$ (zero absolut), energia tuturor electronilor ar trebui să fie nulă. Aceasta este însă în contradicție cu principiul lui Pauli care cere ca

un nivel de energie să nu fie ocupat cu mai mult de doi electroni. De această împrejurare ține seama legea de distribuție a lui Fermi, după care numărul de electroni $\Delta n(w)$ este dat de:

$$\Delta n(w) = \frac{A w^{1/2} dw}{e^{KT} + 1} = n(w) dw. \quad (152.2)$$

Fig. 288 reprezintă pe $n(w)$ în funcție de w la temperaturile: $T = 0$ și $T > 0$. Pentru $T = 0$, electronii ocupă toate nivelele de energie de la 0 la w' , distribuți cîte doi pe fiecare nivel; nivelul de energie w' care poartă numele de *nivelul Fermi*, reprezintă

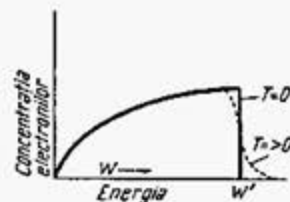


Fig. 288. — Distribuția energiei electronilor de conducție într-un metal.

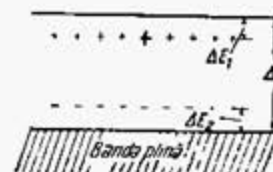


Fig. 289. — Structura de bandă a unui semiconductor extrinsec.

limita distribuției. La temperaturi mai înalte, această limită devine, după cum se vede din fig. 288, mai puțin netă, totuși ea va continua să joace un rol important în cele ce urmează, întrucît curba distribuției se schimbă mult numai la temperaturi foarte înalte cînd se regăsește de altfel distribuția lui Boltzmann.

Tratarea cantitativă, pe aceste baze, a fenomenului de conducție electrică în metale conduce la rezultate în bun acord cu experiența, cel puțin în unele cazuri. În particular, se regăsește că conductivitatea electrică γ variază, în domeniul temperaturilor ordinare, invers proporțional cu temperatura așa cum arată experiența.

153. *Conducția electrică în semiconductori.* La semiconductori, corpuri a căror conductivitate electrică se află între aceea a conductorilor și aceea a izolaților, banda de conducție este complet goală iar benzile inferioare sînt complet pline cu electroni. Trecerea electronilor din banda plină în banda de conducție nu s-ar putea face decât dacă zona interzisă ar fi destul de îngustă pentru ca probabilitatea unei asemenea tranziții să devină apreciabilă. S-ar obține atunci așa-numita conducție prin goluri de care se va vorbi mai departe. Existența unor astfel de semiconductori care se numesc intrinseci este însă îndoielnică la temperaturi care nu sînt cu mult mai înalte decât temperatura normală.

Modelul de semiconductor admis astăzi conține însă și alte nivele de energie suplimentare care pot fi ocupate de electroni și care se situează în zona interzisă; ele devin deosebit importante pentru conducție cînd se află fie în apropierea benzii de conducție fie în apropierea benzii pline (fig. 289). Primele poartă numele de nivele donatoare iar ultimele pe acela de nivele acceptoare. Și unele și altele se datoresc fie imperfecțiunilor rețelei fie unor adaosuri de corpuri străine (impurități). Semiconductori care le conțin se numesc extrinseci. Nivelele donatoare sînt pline la temperatura $T = 0$ și pot da electronii lor benzii de conducție la temperaturi mai mari decât zero absolut. Din contră, nivelele acceptoare trebuie să fie neocupate la temperatura $T = 0$. La temperaturi mai înalte, aceste nivele pot primi electroni din banda plină care rămîne astfel cu un nivel gol. În ambele cazuri conducția electrică devine posibilă. Oxidul cupros ca și seleniul sînt semiconductori extrinseci.

La primul, nivelele suplimentare lucrează ca acceptoare și se datorează imperfecțiilor rețelei cristaline cauzate de lipsa unor ioni de cupru în rețea. La seleniu, nivelele suplimentare lucrează de asemenea ca acceptoare dar modul în care ele apar nu este încă clarificat.

Rezultă din cele de mai sus că conducția electrică a semiconductoarelor se datorează fie electronilor — puțini la număr — care apar în banda de conducție normal goală, fie citorva goluri care apar într-o bandă, în mod normal, complet ocupată. Primul caz este analog cu acela întâlnit la metale, cu deosebirea că energiile acestor electroni în banda de conducție se distribuie, din cauza numărului lor mic, nu după legea lui Fermi ci după aceea a lui Boltzmann. Cu totul altfel se explică conducția electrică în al doilea caz, la care electronii trecuți pe nivelele acceptoare nu joacă un rol direct. Locul liber rămas în banda inferioară după plecarea unui electron poate fi privit ca un gol pozitiv a cărui sarcină este egală dar de semn opus cu a unui electron. Un astfel de gol se poate deplasa prin rețeaua cristalului, la fel ca un electron, prin următorul mecanism simplu. Un electron din banda aproape plină poate neutraliza golul inițial, lăsând în urma sa un alt gol pozitiv; acest proces va continua, astfel că se poate considera că golul se deplasează. De altfel se demonstrează că aceste goluri se comportă ca niște electroni pozitivi ¹⁾ cu masă ceva mai mare decât a unui electron normal. Este posibil ca electronii din banda aproape plină să fie complet ignorați adică să se trateze banda ca fiind complet plină și să se considere golurile, din cauza numărului lor mic, ca un ansamblu de particule care ascultă de legea de distribuție a lui Boltzmann. În acest mod, cazul benzii aproape pline devine similar cu cazul benzii aproape goale despre care s-a vorbit mai sus, cu diferența esențială că aici curentul este transportat de electroni (cu sarcini negative) pe cind în primul caz este transportat de golurile încărcate pozitiv.

Un semiconductor în care curentul este transportat de electronii din banda aproape goală se numește de tipul *n* sau *prin exces*; un semiconductor în care curentul este transportat de golurile din banda aproape plină se numește de tipul *p* sau *prin deficit*. Ambele moduri de conducție pot fi de altfel prezente în mod simultan, dar caracterul semiconductorului este determinat de mecanismul predominant.

Dezvoltarea teoriei pe aceste baze permite să se exprime cantitativ conductivitatea γ a semiconductoarelor. Rezultatele sînt, aproximativ, în bun acord cu experiența, mai ales dacă ele se aplică la monocristale. Astfel, una dintre proprietățile caracteristice ale semiconductoarelor este aceea potrivit căreia conductivitatea γ crește aproape proporțional cu temperatura, în contrast cu ceea ce se observă la metale. Teoria regăsește acest rezultat, ceea ce de altfel se poate vedea imediat. Într-adevăr, înainte ca temperatura să nu fi devenit prea mare, este evident că numărul de electroni care trec de pe nivelele donatoare în banda de conducție sau din banda aproape plină pe nivelele acceptoare, crește cu temperatura. Creșterea numărului purtătorilor de sarcini (electroni sau goluri) va conduce la o creștere a conductibilității. La temperaturi mai înalte, cind numărul electronilor liberi sau a golurilor devine important, sarcina spațială de semn contrar pe care o lasă în urmă se opune sporirii în același ritm a numărului purtătorilor de sarcini care iau parte la conducție. Acest efect împreună cu alte efecte secundare fac să apară o conductivitate maximă care depinde de felul semiconductorului.

154. **Lucrul de extracție și diferența de potențial de contact.** Diferența de potențial de contact între un metal și un semiconductor este de mare importanță în teoria redresoarelor uscate. Ea este aproximativ egală în acest caz cu diferența dintre lucrul de extracție al electronilor din semiconductor și acela din metal.

¹⁾ Aceasta nu înseamnă însă că golurile pozitive pot fi identificate cu pozitronii care apar în fenomenele radioactive.

După cum se știe, lucrul de extracție al unui material este egal cu lucrul necesar pentru a extrage un electron din material și a-l îndepărta la infinit. În tabela 22 este dat lucrul de extracție în eV pentru câteva metale, dintre acelea care intervin în redresoarele uscate. Pentru semiconductoarele de tipul *n*, aceste valori sînt ceva mai mici, iar pentru semiconductoarele de tipul *p*, sînt ceva mai mari.

Cu toate acestea, din cauza distribuției de viteze a electronilor există totdeauna un număr mic de electroni a căror energie este suficientă, chiar la temperatura ordinară, pentru a ieși afară din material. Cum ei nu se pot îndepărta prea mult de suprafața materialului din cauza forțelor de imagine care îi readuc înapoi, vor forma acolo o foarte îngustă sarcină spațială. Fig. 290 *a* reprezintă diagrama energetică în acest caz: x reprezintă lucrul de extracție a electronilor, F este nivelul Fermi în cazul unui metal sau nivelul cel mai de jos al benzii de conducție în cazul unui semiconductor, AB este grosimea sarcinii spațiale în afara materialului. După cum se vede, potențialul crește pe măsură ce distanța de la suprafață crește, devenind constant la distanța la care forțele de imagine ajung să fie foarte mici.

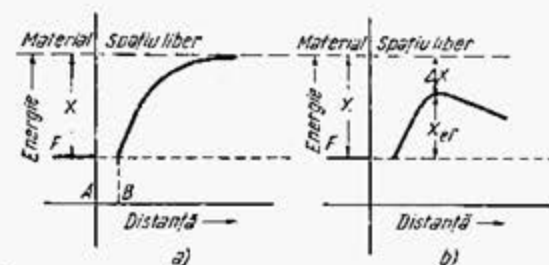


Fig. 290 — Distribuția potențialului la suprafața unui metal în absența (a) și în prezența (b) a unui câmp electric.

Lucrul de extracție efectiv poate însă scădea prin aplicarea potrivită a unui câmp electric. Acesta face ca distribuția potențialului la suprafața materialului să ia forma din fig. 290b. Lucrul de extracție efectiv x_{ef} este mai mic decât lucrul de extracție normal cu cantitatea Δx . Efectul devine în deosebi sensibil la câmpuri foarte mari (de ordinul $10^5 - 10^6$ V/cm). Pe de altă parte, această formă particulară a curbei potențialului permite ca electronii să străbată bariera de potențial chiar dacă energiile lor sînt inferioare celeia corespunzătoare nivelului Fermi. Acest fenomen, cunoscut sub numele de *efectul tunel* a fost pus în evidență prin considerente de mecanică cuantică.

După cum s-a spus, diferența de potențial de contact între un conductor și un semiconductor este aproximativ egală cu diferența între lucrările lor de extracție. La temperatură ordinară, nepotrivirea este de ordinul a 0,025 eV în timp ce diferența de potențial de contact este cuprinsă între 0,2 și 0,5 eV.

Prin stabilirea contactului între un metal și un semiconductor, toate nivelele de energie electronice ale semiconductorului sînt coborîte cu cantitatea de energie $e\Phi$, corespunzătoare diferenței de potențial de contact Φ între metal și semiconductor (e = sarcină electrică a electronului). Acest fenomen se datorește apariției unui dublu strat de sarcini electrice în apropierea suprafeței de contact. Acest dublu strat lucrează ca o barieră de potențial și existența lui constituie o condiție esențială pentru redresare.

155. **Teoriile asupra redresării.** Deși în ultimii 25 ani a fost elaborat un număr mare de teorii care caută să explice funcționarea redresoarelor uscate, nu au reușit să se impună pînă acum decît câteva, fără ca totuși acestea să

Tabela 22. Lucrul de extracție, în eV, al citorva elemente

Cu	4,1	Bi	4,44
Ni	4,9	Pb	4,50
Sa	4,2	Mg	3,6

sunt complet satisfăcătoare. Motivele care au condus la această situație sunt următoarele: 1. În timp ce conducția electrică asimetrică este un fenomen simplu care poate fi explicat pe diverse căi, regăsirea formei exacte a caracteristicii curent-tensiune ca și a celorlalte proprietăți secundare ale redresoarelor ridică dificultăți extrem de serioase. 2. Fenomenele care se cer a fi explicate nu sunt niciodată univoc determinate, ci sunt influențate de un număr mare de parametri de natură tehnologică.

Dintre aceste teorii, trei sunt acelea care prezintă azi o mai mare importanță, și anume: a) teoria difuziei termice; b) teoria diodei și c) teoria barierei fizice. Primele două presupun că redresarea are loc într-o regiune îngustă situată între metal și semiconductor și a cărei constituție este diferită de aceea a semiconductorului și a metalului. O astfel de barieră chimică există la redresorul cu oxid cupros; aici, în masa semiconductorului, se află oxigen în exces pe cind pătura de la margine are o compoziție stehiometrică. De asemenea și redresoarele cu seleniu își datorează o parte dintre proprietățile lor unei bariere chimice care apare în urma unei reacții chimice între semiconductorul de seleniu și contraelectrod.

A treia teorie admite că redresarea se datorează exclusiv apariției unei sarcini spațiale între conductorul și semiconductorul în contact. Se recunoaște astăzi că o asemenea barieră fizică sau naturală apare atât la contactul între un metal și un semiconductor cit și la contactul dintre două metale. De aceea, de cele mai multe ori, caracterul stratului de baraj este mixt sau, cel puțin, predomină una dintre cele două categorii de bariere.

Toate cele trei teorii asupra redresării fac uz de ideile actuale asupra structurii metalelor și semiconductorilor, rezumate în paragrafele anterioare.

156. **Teoria difuziei termice.** Deși oxidul cupros și seleniul sînt semiconductoare de tipul *p*, se obișnuiește, din motive de simplitate, să se trateze mai întâi teoria contactului între un semiconductor de tipul *n* și metal; trecerea la semiconductorul de tipul *p* se face apoi destul de simplu.

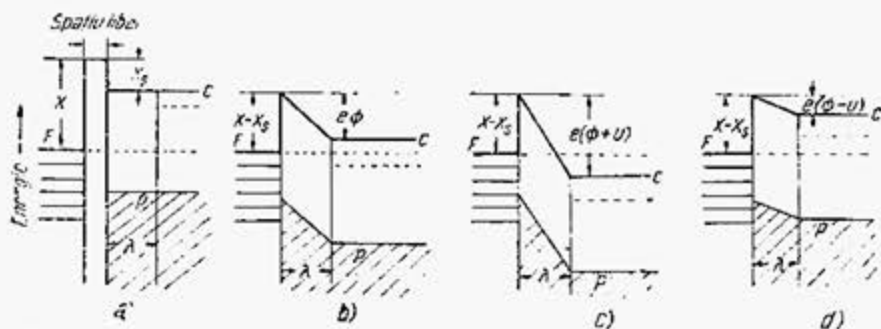


Fig. 291. — Redresarea în cazul unei bariere chimice aflate între un metal și un semiconductor de tip *n*.

Fig. 291a reprezintă schema energetică a unui metal și a unui semiconductor prin exces, înainte de contact. Notațiile pentru metal sînt aceleași ca în fig. 290. Pentru semiconductor, *C* reprezintă nivelul cel mai de jos al benzii de conducție, *P* este banda plină x_s reprezintă lucrul de extracție a electronilor din banda de conducție a semiconductorului. Linia întreruptă de sub nivelul *C*, corespunde nivelelor donatoare. Grosimea barierei chimice este notată cu λ .

După cum s-a arătat, cei mai mulți dintre electronii din metal au, la temperatura ordinară, energii inferioare nivelului Fermi; există însă un număr ale căror energii sînt mai mari și cîțiva care sînt capabili să atingă chiar nivelul corespunzător limitei metalului. De asemenea, puțini electroni din banda de conducție a semiconductorului sînt înghesuți în imediata vecinătate a nivelului *C*; totuși concentrația lor pe nivelele superioare ale aceleiași benzi nu este niciodată zero¹⁾. Este atunci evident că, după stabilirea contactului, va exista — sub influența agitației termice — un schimb constant de electroni între metal și semiconductor. Dar, pentru că nivelul *C* din semiconductor este mult superior nivelului Fermi din metal și deci electronii din metal au energii mai mici decît cei din semiconductor, va exista tendința ca mai mulți electroni să intre în metal decît în semiconductor. Ca urmare, metalul se va încărea negativ și semiconductorul, pozitiv. Procesul continuă pînă se stabilește un echilibru între cele două tendințe. Apare atunci o diferență de potențial Φ între metal și semiconductor, care la echilibru este egală cu diferența de potențial de contact (§ 154); pe de altă parte, nivelele din banda de conducție a semiconductorului se coboară din cauza sarcinii negative pe care aceasta o capătă.

Diferența de potențial Φ se opune trecerii mai departe a electronilor din semiconductor în metal; ea constituie o barieră de potențial care se suprapune peste bariera chimică existentă, întrucît electronii provin din masa semiconductorului. Înălțimea acestei bariere poate fi micșorată sau mărită prin aplicarea în mod potrivit a unei diferențe de potențial exterioare. Acestei împrejurări i se datorează fenomenul de redresare.

Într-adevăr, dacă această diferență de potențial exterioară *U* va fi de același sens cu Φ , nivelele de energie din banda de conducție a celui dinți se vor coborî și mai mult; numărul de electroni care părăsește metalul rămîne neschimbat, însă tranziția electronilor în sensul invers va fi foarte mult împiedicată (fig. 291c). În sfîrșit, fig. 291d reprezintă cazul invers. Nivelele de energie din banda de conducție se vor ridica, bariera de potențial va scădea și electronii vor trece mai ușor din semiconductor în metal. Cazul optim se obține cînd tensiunea aplicată este egală în mărime cu diferența de potențial de contact Φ , ceea ce conduce la dispariția barierei de potențial. Astfel, prin aplicarea unui potențial negativ pe semiconductor, se poate trece prin contactul dintre metal și semiconductor un curent intens pe cînd prin aplicarea unui potențial negativ, curentul se întrerupe. Efectul de redresare apare, dar are sensul invers față de acela întîlnit la redresoarele de care ne ocupăm, unde conductivitatea este maximă, de la metal la semiconductor (§ 148 α și β). Aceasta se datorează faptului că semiconductorul este de tipul *p*, caz în care electronii se află pe nivele mult sub nivelul Fermi al metalului; de aceea, electronii pot mai ușor trece din metal în semiconductor, decît invers.

Teoria de mai sus permite explicarea calitativă a existenței barierei de potențial și a modului în care aceasta intervine în procesul de redresare. Ea este comună tuturor teoriilor asupra redresării, prezentate aici. Fiecare dintre acestea caută să obțină, în primul rînd, forma caracteristicii curent-tensiune, calculînd rezistența barierei.

În cazul teoriei difuziei, se pleacă de la faptul că densitatea *J* a curentului invers ce străbate bariera este determinată de cele două tendințe contrare: electronii tind să treacă prin bariera datorită acțiunii cîmpului electric aplicat $E = (\Phi + U)/\lambda$, și fenomenului de difuzie care apare din cauza diferenței de concentrație a

¹⁾ Se poate arăta că concentrația electronilor pe nivelele benzii de conducție scade exponențial de la nivelul *C* spre nivelele superioare.

electronilor din semiconductor și din metal. Ecuația de la care se pornește va fi deci:

$$J = nebE - De \frac{dn}{dx}, \quad (156.1)$$

în care:

- n este concentrația electronilor;
- b — mobilitatea lor;
- e — sarcina elementară;
- D — coeficientul de difuzie;
- $\frac{dn}{dx}$ — gradientul de concentrație al electronilor.

Calculul este condus mai departe pe baza mai multor ipoteze simplificatoare dintre care cele mai importante sînt: a) grosimea λ a barierei chimice este considerată relativ mare; b) cîmpul electric E în barieră este presupus uniform; c) rezistența semiconductorului este neglijabilă. Se ajunge pe această cale la următoarea expresie pentru conductivitatea $\frac{1}{\rho}$ a redresorului în sensul de blocare a curentului:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{\infty}} \left(1 + \frac{\Phi}{u} \right) \epsilon^{\frac{(\Phi+u)^2 - \Phi^2}{4}}; \quad (156.2)$$

unde:

$$\frac{1}{\rho_{\infty}} = \frac{ebn_{\infty}}{\lambda} \epsilon^{\frac{-e\Phi}{KT}},$$

Aici n_{∞} reprezintă concentrația totală a electronilor în banda de conducție, A este o constantă, iar u este tensiunea aplicată din exterior (inversă). Ecuația (156.2) arată că ρ începe să crească atunci cînd tensiunea inversă u devine foarte mare, ceea ce este în acord cu rezultatele experimentale (fig. 279).

157. Teoria diodei. Spre deosebire de teoria difuziei termice, teoria diodei presupune că grosimea barierei chimice este foarte mică. În acest caz, trecerea electronilor prin barieră nu mai poate fi guvernată de legile clasice ale difuziei și calculul se conduce în alt mod. Plecînd de la faptul că distribuția de viteze a electronilor din banda de conducție a semiconductorului se supune legii lui Boltzmann, se consideră că numai acei electroni vor trece din semiconductor în metal (la aplicarea unei tensiuni inverse u) care posedă o energie cinetică mai mare decît energia corespunzătoare înălțimii barierei de potențial, adică:

$$\frac{1}{2} mv^2 \geq e(\Phi + u).$$

Calculul arată că numărul acestor electroni va fi:

$$n_1 = n_{\infty} \left(\frac{KT}{2\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \epsilon^{\frac{-e(\Phi+u)}{KT}}. \quad (157.1)$$

Există însă, așa cum s-a arătat și un flux de electroni în sens contrar care rămîne constant și care va fi deci egal cu n_2 cînd $u = 0$. Deci:

$$n_2 = n_{\infty} \bar{v} \epsilon^{\frac{-e\Phi}{KT}}, \quad (157.2)$$

unde $\bar{v} = (KT/2\pi m)^{1/2}$ reprezintă viteza medie a electronilor. Densitatea curentului care străbate redresorul sub acțiunea unei tensiuni inverse u va fi atunci:

$$J = e \bar{v} (n_1 - n_2), \quad (157.3)$$

iar rezistivitatea corespunzătoare;

$$\frac{1}{\rho} = \frac{J}{u} = \frac{n_{\infty} e \bar{v}^2}{u} \epsilon^{\frac{-e\Phi}{KT}} \left(1 - \epsilon^{\frac{-eu}{KT}} \right). \quad (157.4)$$

Se observă că această expresie diferă de ecuația (156.2); în primul rînd, conductivitatea apare aici ca fiind independentă de grosimea barierei, ceea ce corespunde cu unele constatări experimentale. În rest, diferența dintre cele două ecuații se datorește în special faptului că la deducerea ecuației (156.2) s-a ținut seamă și de forțele de imagine care, în teoria diodei, sînt neglijate. De altfel această teorie s-a dovedit a conveni mai bine redresoarelor cu germaniu, decît acelor de care ne ocupăm.

158. Teoria barierei fizice. Deosebirea esențială dintre teoria barierei fizice și teoria difuziei termice constă în aceea că prima nu mai postulează existența unei bariere chimice între metal și semiconductor, deși difuzia termică a electronilor continuă să joace și aici un rol important. Rămînînd tot în cazul unui semiconductor de tipul n (fig. 292a), se ajunge la apariția barierei de potențial, absolut necesară pentru redresare, în felul următor.

Imediat după stabilirea contactului între metal și semiconductor, unii dintre electronii din banda de conducție a semiconductorului vor cădea pe nivelul Fermi al metalului, din cauza lucrului de extracție mai mic al semiconductorului. Ca și în cazul discutat la § 156, la naștere o sarcină spațială pozitivă în semiconductor, în imediata vecinătate a suprafeței de contact și care se întinde pe o distanță λ_0 , în timp ce suprafața metalului capătă o sarcină negativă. Efectul acestei păături duble este de a scădea energia nivelelor în masa semiconductorului cu cantitatea $x - x_0$ cînd numărul electronilor care trece din semiconductor în metal este egal cu acela al electronilor care parcurg drumul invers, prin difuzie termică. În regiunea sarcinii spațiale pozitive, formă nivelelor are o alură de trecere continuă de la metal spre semiconductor.

Fig. 292b reprezintă schema energetică a celor două corpuri în contact. După cum se vede, căderea de potențial în regiunea barierei nu mai fiind linară, cîmpul electric E nu mai este constant. Ca urmare, ecuația (156.1):

$$J = ebE(x) n(x) - De \frac{dn}{dx}, \quad (158.1)$$

de la care se pornește și în acest caz pentru calculul caracteristicii curent-tensiune conține încă două variabile, E și n în domeniul barierei. Calculul, condus aproximativ în același mod ca la § 156, dă pentru densitatea de curent în sensul de blocaj, expresia:

$$J = n_{\infty} eb \left[(\Phi + u) \frac{8\pi Ne}{K} \right]^{\frac{1}{2}} \epsilon^{\frac{-e\Phi}{KT}} \left(1 - \epsilon^{\frac{-eu}{KT}} \right), \quad (158.2)$$

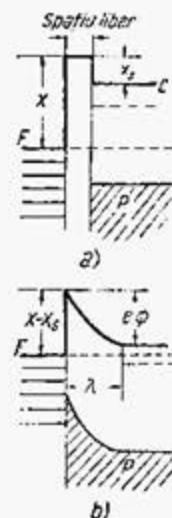


Fig. 292. — Barierea fizică în cazul contactului între un metal și un semiconductor de tipul n .

unde N reprezintă densitatea centrelor de impuritate ionizate care contribuie la sarcina spațială. Ecuația (158.2) arată că o dată cu creșterea tensiunii inverse u , curentul crește mai întâi repede până când $u \sim \frac{KT}{e} \approx 25$ mV pentru $T = 300^\circ\text{K}$.

După aceasta, creșterea curentului este mai lentă până la tensiuni pentru care scăderea lucrului de extracție începe să devină importantă.

159. Compararea teoriilor asupra redresării cu rezultatele experimentale. După cum s-a arătat, teoriile asupra redresării tind să regăsească caracteristica curent-tensiune a redresoarelor, introducând anumite ipoteze simplificatoare pentru calcul (§ 156). Aceasta constituie un prim motiv, pentru care rezultatele teoriei nu concordă decât puțin cu datele experimentale culese asupra redresoarelor întrebuințate curent în practică, pentru care diverșii parametri de construcție nu sînt niciodată perfect cunoscuți. Concluzii mai satisfăcătoare se obțin însă dacă se experimentează cu redresoare construite în laborator, în condiții mai apropiate de acelea pentru care teoria ar trebui să fie valabilă.

Datele experimentale culese în acest mod arată că teoria difuziei, aplicată atît în cazul barierei chimice, cît și în cazul barierei fizice, este satisfăcătoare atît timp cît se lucrează cu tensiuni mici. La tensiuni directe mai mari, adică la curenți mai intensi, ipoteza că rezistența semiconductorului poate fi neglijată nu mai este valabilă. Ea introduce o cădere de tensiune suplimentară care face ca panta curbei să scadă sub valoarea dată de teorie. De asemenea, la tensiuni inverse mai mari (de ordinul unui volt, pentru redresoarele cu oxid cupros sau seleniu) rezistența barierei începe să descrească, în timp ce ecuația (158.1) arată o descreștere continuă a curentului și deci o creștere corespunzătoare a rezistenței. S-a dovedit că acest efect se datorește în bună parte scăderii lucrului de extracție a electronilor sub acțiunea câmpului electric (§ 154). La temperaturi mai înalte, energiile de agitație termică sînt mai mari și ca urmare acest efect poate fi mai puțin important. S-a constatat într-adevăr că, la asemenea temperaturi, concordanța între experiență și teorie este mai bună.

Explicarea fenomenelor de alunecare a curentului și îmbătrînire (§ 150 z) nu rezultă direct din teoriile prezentate mai sus. Unele încercări au fost însă făcute pentru a se pune aceste fenomene pe seama difuziei termice a centrelor de impuritate spre regiunea barierei, sub influența cîmpurilor electrice. În cazul alunecării curentului, intervin cîmpurile electrice aplicate. În cazul îmbătrînirii, intervine și cîmpul datorit diferenței de potențial de contact, prezent și cînd redresorul nu lucrează. Influența acestor cîmpuri asupra centrelor de impuritate va crește o dată cu temperatura, ceea ce ar putea constitui o explicație a procesului de formare a redresoarelor (§ 148 β). Analiza mai amănunțită a acestor fenomene arată că explicația de mai sus este destul de consistentă.

c) Date tehnice privind exploatarea redresoarelor uscate

160. Randamentul redresoarelor uscate. Randamentul redresoarelor uscate depinde de:

- pierderile produse de curentul direct în rezistența redresorului;
- pierderile produse de curentul invers în rezistența redresorului;
- pierderile produse de curentul invers în circuitul de utilizare al redresorului;
- pierderile în circuitul de utilizare al redresorului datorită componentei pulsatorii a curentului redresat.

Pentru randamentul unui singur element redresor contează numai primele două pierderi; ultimele depinzînd de circuitul de redresare utilizat.

Din punctul de vedere al pierderilor produse de curentul direct și curentul invers, se poate privi redresorul ca o rezistență. Cea mai mare parte din energia pierdută este transformată în căldură în stratul semiconductor, astfel că grosimea acestui strat este decisivă pentru randamentul unui redresor uscat. S-a constatat că o grosime mare a păturii semiconductoare măsoară curentul invers, în schimb crește și rezistența directă, ceea ce sporește pierderile prin încălzire produse de curentul direct. Din această cauză nu se poate depăși o anumită grosime a stratului semiconductor din cauza importanței dominante a rezistenței directe.

Grosimea stratului semiconductor este hotărîtoare și pentru tensiunea de străpungere a fiecărui element redresor, adică tensiunea inversă admisibilă. Pentru a nu mări grosimea stratului semiconductor este nevoie ca la tensiuni ridicate să se utilizeze mai multe elemente legate în serie. Din această cauză, la redresoarele uscate căderea de tensiune crește proporțional cu numărul elementelor.

Redresorul uscat pînă la un anumit grad poate fi asimilat din acest punct de vedere cu o rezistență pură, căderea de tensiune este proporțională cu tensiunea de utilizare și deci randamentul este independent de alegerea acestei tensiuni. În cele mai multe cazuri, valoarea randamentului se situează în jur de 70 %.

În fig. 293 sînt reproduse curbele randamentului unui redresor cu oxid cupros în funcție de tensiune, fără includerea pierderilor din transformator și cu includerea pierderilor din transformator. Curbele sînt valabile pentru o sarcină de 0,5 kW. Pentru comparație, se indică și curbele randamentului la un redresor cu catod cald.

161. Repartiția tensiunii la mai multe elemente redresoare montate în serie. Încărcarea unui element redresor este limitată de tensiunea inversă și de densitatea de curent admisibilă. Limita de tensiune, echivalentă cu rezistența de străpungere, este determinată de grosimea păturii semiconductoare care, așa cum s-a arătat,

nu trebuie să depășească o anumită valoare, din cauza pierderilor prin curentul direct.

Din această cauză nu este posibil să se depășească, la o funcționare de durată, o tensiune de vîrf de 8–10 V, pentru redresorul cu oxid cupros și 20–25 V pentru redresorul cu seleniu. Acest inconvenient se remediază prin montarea mai multor elemente redresoare în serie.

Tensiunile de străpungere, în cazul unei acțiuni de scurtă durată (sutimi de secundă) sînt 20–70 V la cuproxid și 50–80 la seleniu.

Din fig. 294 se vede că repartiția tensiunii poate fi foarte diferită de la element la element, din cauza fluctuațiilor mari a rezistenței lor.

Astfel fig. 294 arată că aproape jumătate din elemente se găsesc solicitate la tensiuni peste tensiunea normală și cealaltă jumătate la tensiuni sub cea normală. Variația maximă de tensiune este de 30–40% și numai un mic număr de elemente sînt supuse la tensiuni normale. La curenți mari, în locul montării în paralel a mai multor elemente, este potrivit să se utilizeze redresoare de mare

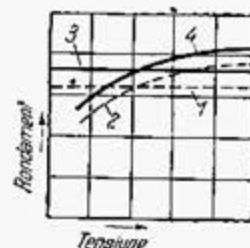


Fig. 293. — Randamentul redresoarelor în funcție de tensiunea de utilizare:

- 1 — redresor cu catod cald fără transformator;
- 2 — redresor cu catod cald cu transformator;
- 3 — redresor uscat fără transformator;
- 4 — redresor uscat cu transformator.

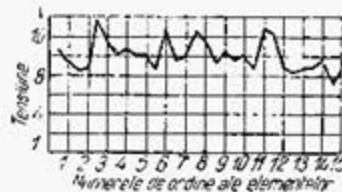


Fig. 294. — Repartiția tensiunii la mai multe elemente redresoare montate în serie.

suprafață care au avantajul că se assemblează mai ușor și au o greutate mai mică. Răcirea lor poate fi eventual forțată (fig. 272).

162. **Durata redresoarelor uscate.** Experiența a arătat că durata redresoarelor uscate nu este atinsă de nici un alt tip de redresor. Astfel viața unui redresor cu oxid cupros este de câteva ori mai mare decât durata de funcționare a unui redresor cu catod cald. Acest fapt este valabil însă numai pentru un element redresor și nu pentru montaje de redresoare uscate.

La grupurile de elemente redresoare industriale, se observă câteodată, în primele zile de funcționare, un mers intermitent și o ușoară reducere a factorului de redresare (§ 149 a). Aceste fenomene au diverse cauze, care se datoresc mai ales modului de asamblare a elementelor redresoare și fenomenelor din stratul de baraj al semiconductorului. În primul rând, discul de plumb utilizat la contactul elementelor redresoare ajunge să ia o formă și o poziție finală numai după câțiva timp de la punerea în funcțiune, sub influența presiunii și a încălzirii suprafeței plăcii străbătute de curentul sarcinii respective. Acest inconvenient se îndepărtează ușor prin utilizarea unor rondeluri arcuite din material elastic montate pe axul de prindere al elementelor și despre care s-a vorbit la § 148 a.

Intervin apoi fenomenele care se desfășoară în perioada inițială de funcționare în stratul de baraj al semiconductorului: îmbătrânirea și deformarea continuă a caracteristicii, despre care s-a vorbit la § 150. Fenomenul de îmbătrânire conduce la creșterea căderii de tensiune în redresor, deci la creșterea încălzirii și micșorarea randamentului. Pentru a evita efectul îmbătrânirii în timpul exploatării, redresoarele uscate sînt supuse unei îmbătrîniri artificiale, prin ținerea lor un anumit timp la temperatură înaltă.

163. **Circuite cu redresoare uscate.** Datorită conducției lor unidirectionale, redresoarele uscate sînt utilizate pentru transformarea curentului alternativ în curent continuu. Curentul continuu rezultat este un curent pulsatoriu.

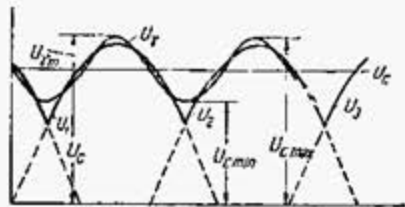


Fig. 295. - Tensiunea redresată și sinusoida de ondulație.

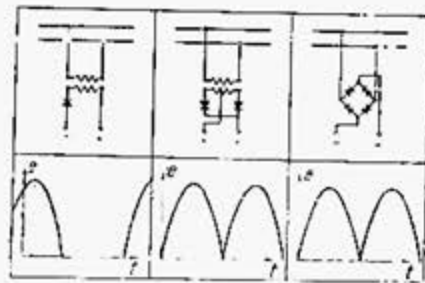


Fig. 296. - Montajele normale cu redresoare uscate pentru redresarea curentului alternativ monofazat.

Se definește ca fiind factorul de ondulație sau de formă al unde de tensiune, redresate raportul procentual dintre valoarea eficace a sinusoidalei care încadrează pulsațiile tensiunii redresate și valoarea medie a tensiunii redresate (fig. 295):

$$K_o = \frac{u_{ef}}{U_{med}} \cdot 100.$$

În tabela 23 sînt indicate aceste valori pentru o redresare a unui număr de două și trei faze.

Redresarea curentului alternativ monofazat. În fig. 296, sînt indicate cele trei montaje utilizate pentru redresarea curentului alternativ monofazat, cît și undele de tensiune redresată corespunzătoare fiecărui montaj.

Tabela 23

Numărul fazelor	2	3
Tensiunea echivalentă de ondulație	0,67 0,474	0,25 0,177
Factorul de ondulație	47,4%	17,7%

Redresarea curentului alternativ trifazat. În fig. 297, sînt indicate trei montaje utilizate pentru redresarea curentului alternativ trifazat și undele de tensiune redresată pentru fiecare montaj. Se vede că utilizarea unui montaj în punte pe fiecare fază produce o tensiune continuă cu un factor de formă foarte redus. Forma curentului redresat pentru diverse sarcini este arătată în fig. 298.

d) Utilizarea redresoarelor uscate

164. **Încărcarea de durată a bateriilor de acumuloare.** Pentru baterii cu o putere de încărcare pînă la 1 kW, se utilizează redresoare cu oxid cupros sau seleniu cu răcire naturală cu aer. În timpul încărcării tensiunea bateriei crește pînă la 30% față de tensiunea inițială; curentul de încărcare va scădea deci în același raport. În plus, variațiile de tensiune ale rețelei de curent alternativ se transmit pe partea de curent continuu.

În fig. 299 este reprezentată schema dispozitivului pentru încărcarea de durată a bateriilor și curba tensiunii în funcție de curentul de sarcină.

Influența curentului invers la circuitele pentru încărcarea bateriilor de acumuloare este neglijabilă, din cauza raportului mare între curentul direct și invers.

165. **Încărcarea rapidă a bateriilor de acumuloare.** a) *Baterii pînă la 1 kW.* Se utilizează redresoare monofazate în punte, fără răcire forțată. Cînd curenții de încărcare au valori mari, este necesar, pentru o încărcare rapidă, să se obțină o curbă curent-tensiune cît mai înclinată (fig. 300). Pentru aceasta, secundarul transformatorului are borne suplimentare cu ajutorul cărora se realizează un reglaj manual al tensiunii.

În alt montaj se folosește, pentru reglarea tensiunii, un reactor cu saturație sau un transformator cu miez suplimentar, prin care este derivat o parte din fluxul produs de înfășurarea primară a transformatorului.

Prin modificarea poziției miezului variază fluxul care-l străbate și deci și fluxul care străbate înfășurarea secundară.

b) *Baterii peste 1 kW.* Se utilizează unul dintre montajele din fig. 301, montaj trifazat simplu (a) sau montaj trifazat în punte (b). Pentru obținerea caracteristicii înclinate, adică o cădere de tensiune accentuată în funcție de creșterea curentului, se utilizează un transformator cu flux de scăpări mare sau o bobină de reacțanță, care mai prezintă și avantajul că determină o îmbunătățire a randamentului.

În fig. 302 este reprezentată curba de încărcare curent-timp. Redresorul furnizează un curent normal de încărcare pînă cînd tensiunea a atins 2,4 V, apoi scade rapid, astfel că atunci cînd tensiunea a atins valoarea de 2,6–2,7 V pe celulă, curentul este numai 50% din valoarea normală de încărcare. La această valoare, redresorul, respectiv bateria, poate fi decuplat de la rețea.

Încărcarea rapidă a bateriilor de acumuloare se face în instalații speciale în care se încarcă zilnic un număr mare de acumuloare.

În sfîrșit, mai trebuie să se menționeze că se folosesc și scheme de montaj care conduc la o încărcare automată a bateriilor.

suprafață care au avantajul că se assemblează mai ușor și au o greutate mai mică. Răcirea lor poate fi eventual forțată (fig. 272).

162. Durata redresoarelor uscate. Experiența a arătat că durata redresoarelor uscate nu este atinsă de nici un alt tip de redresor. Astfel viața unui redresor cu oxid cupros este de câteva ori mai mare decât durata de funcționare a unui redresor cu catod cald. Acest fapt este valabil însă numai pentru un element redresor și nu pentru montaje de redresoare uscate.

La grupurile de elemente redresoare industriale, se observă câteodată, în primele zile de funcționare, un mers intermitent și o ușoară reducere a factorului de redresare (§ 149 a). Aceste fenomene au diverse cauze, care se datoresc mai ales modului de asamblare a elementelor redresoare și fenomenelor din stratul de baraj al semiconductorului. În primul rând, discul de plumb utilizat la contactul elementelor redresoare ajunge să ia o formă și o poziție finală numai după ceva timp de la punerea în funcțiune, sub influența presiunii și a încălzirii suprafeței plăcii străbătute de curentul sarcinii respective. Acest inconvenient se îndepărtează ușor prin utilizarea unor rondeluri arcuite din material elastic montate pe axul de prindere al elementelor și despre care s-a vorbit la § 148 a.

Intervin apoi fenomenele care se desfășoară în perioada inițială de funcționare în stratul de baraj al semiconductorului: îmbătrânirea și deformarea continuă a caracteristicii, despre care s-a vorbit la § 150. Fenomenul de îmbătrânire conduce la creșterea căderii de tensiune în redresor, deci la creșterea încălzirii și micșorarea randamentului. Pentru a evita efectul îmbătrânirii în timpul exploatarei, redresoarele uscate sînt supuse unei îmbătrîniri artificiale, prin ținerea lor un anumit timp la temperatură înaltă.

163. Circuite cu redresoare uscate. Datorită conductivității lor unidirectionale, redresoarele uscate sînt utilizate pentru transformarea curentului alternativ în curent continuu. Curentul continuu rezultat este un curent pulsatoriu.

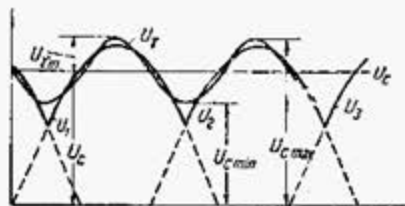


Fig. 295. — Tensiunea redresată și sinusoida de ondulație.

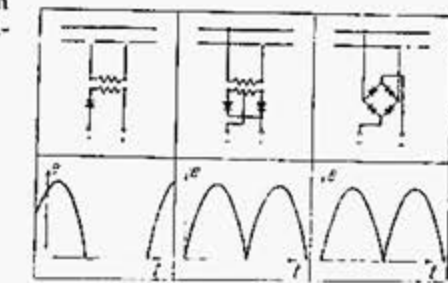


Fig. 296. — Montajele normale cu redresoare uscate pentru redresarea curentului alternativ monofazat.

Se definește ca fiind factorul de ondulație sau de formă al unde de tensiune, redresate raportul procentual dintre valoarea eficace a sinusoidelor care încadrează pulsațiile tensiunii redresate și valoarea medie a tensiunii redresate (fig. 295):

$$K_0 = \frac{U_{ef}}{U_{med}} \cdot 100.$$

În tabela 23 sînt indicate aceste valori pentru o redresare a unui număr de două și trei faze.

Redresarea curentului alternativ monofazat. În fig. 296, sînt indicate cele trei montaje utilizate pentru redresarea curentului alternativ monofazat, cît și undele de tensiune redresată corespunzătoare fiecărui montaj.

Tabela 23

Numărul fazelor	2	3
Tensiunea echivalentă de ondulație	0,67 0,474 47,4%	0,25 0,177 17,7%
Factorul de ondulație		

Redresarea curentului alternativ trifazat. În fig. 297, sînt indicate trei montaje utilizate pentru redresarea curentului alternativ trifazat și undele de tensiune redresată pentru fiecare montaj. Se vede că utilizarea unui montaj în punte pe fiecare fază produce o tensiune continuă cu un factor de formă foarte redus. Forma curentului redresat pentru diverse sarcini este arătată în fig. 298.

d) Utilizarea redresoarelor uscate

164. Încărcarea de durată a bateriilor de acumuloare. Pentru baterii cu o putere de încărcare pînă la 1 kW, se utilizează redresoare cu oxid cupros sau seleniu cu răcire naturală cu aer. În timpul încărcării tensiunea bateriei crește pînă la 30% față de tensiunea inițială; curentul de încărcare va scădea deci în același raport. În plus, variațiile de tensiune ale rețelei de curent alternativ se transmit pe partea de curent continuu.

În fig. 299 este reprezentată schema dispozitivului pentru încărcarea de durată a bateriilor și curba tensiunii în funcție de curentul de sarcină.

Influența curentului invers la circuitele pentru încărcarea bateriilor de acumuloare este neglijabilă, din cauza raportului mare între curentul direct și invers.

165. Încărcarea rapidă a bateriilor de acumuloare. a) *Baterii pînă la 1 kW.* Se utilizează redresoare monofazate în punte, fără răcire forțată. Cînd curenții de încărcare au valori mari, este necesar, pentru o încărcare rapidă, să se obțină o curbă curent-tensiune cît mai înclinată (fig. 300). Pentru aceasta, secundarul transformatorului are borne suplimentare cu ajutorul cărora se realizează un reglaj manual al tensiunii.

În alt montaj se folosește, pentru reglarea tensiunii, un reactor cu saturație sau un transformator cu miez suplimentar, prin care este derivat o parte din fluxul produs de înfășurarea primară a transformatorului.

Prin modificarea poziției miezului variază fluxul care-l străbate și deci și fluxul care străbate înfășurarea secundară.

b) *Baterii peste 1 kW.* Se utilizează unul dintre montajele din fig. 301, montaj trifazat simplu (a) sau montaj trifazat în punte (b). Pentru obținerea caracteristicii înclinate, adică o cădere de tensiune accentuată în funcție de creșterea curentului, se utilizează un transformator cu flux de scăpări mare sau o bobină de reacțanță, care mai prezintă și avantajul că determină o îmbunătățire a randamentului.

În fig. 302 este reprezentată curba de încărcare curent-timp. Redresorul furnizează un curent normal de încărcare pînă cînd tensiunea a atins 2,1 V, apoi scade rapid, astfel că atunci cînd tensiunea a atins valoarea de 2,6–2,7 V pe celulă, curentul este numai 50% din valoarea normală de încărcare. La această valoare, redresorul, respectiv bateria, poate fi decuplat de la rețea.

Încărcarea rapidă a bateriilor de acumuloare se face în instalații speciale în care se încarcă zilnic un număr mare de acumuloare.

În sfîrșit, mai trebuie să se menționeze că se folosesc și scheme de montaj care conduc la o încărcare automată a bateriilor.

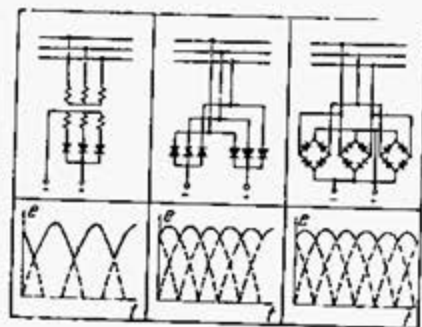


Fig. 297. — Montaje normale cu redresoare uscate pentru redresarea curentului alternativ trifazat.

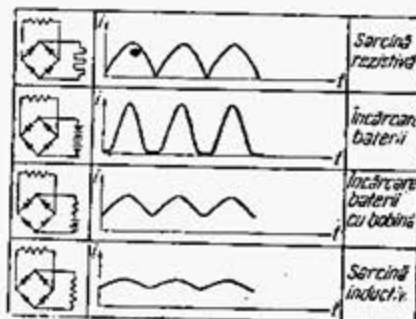


Fig. 298. — Curbele de curent pentru diferite feluri de sarcini în circuite cu redresoare uscate.

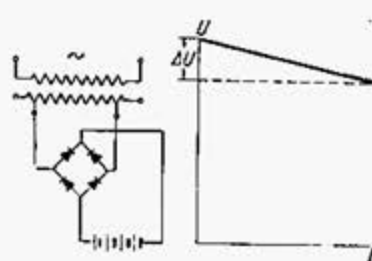


Fig. 299. — Schema de montaj a redresorului pentru încărcarea de durată a bateriilor de acumulație și caracteristica de încărcare.

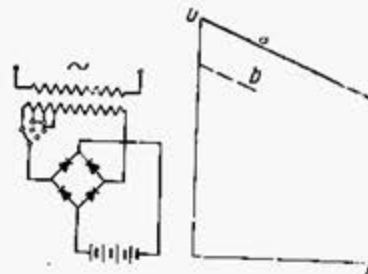


Fig. 300. — Schema de montaj a redresorului pentru încărcarea rapidă a bateriilor de acumulație și curba caracteristică.

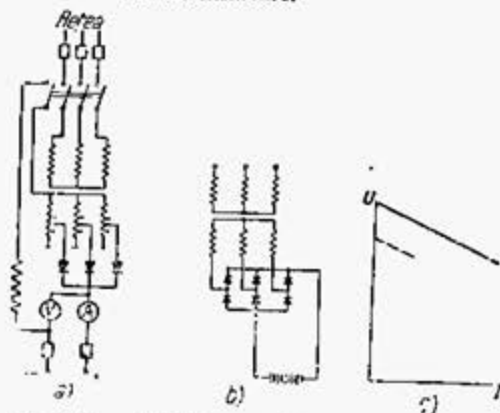


Fig. 301. — Montaje normale pentru încărcarea bateriilor de peste 1 kW (a și b) și caracteristica curent-tensiune (c).

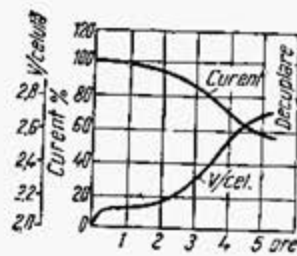


Fig. 302. — Curba de încărcare curent-timp pentru un redresor întrebuit la încărcarea rapidă a bateriilor de acumulație.

166. Alimentarea lămpilor cu arc. Se utilizează redresoare în punte trifazată (schema Larionov). Pentru stabilirea arcului și pentru reglajul curentului se utilizează bobine pe partea de curent alternativ a circuitului (fig. 303). În felul acesta se obține caracteristica foarte rapidă de pornire și o tensiune de mers în gol foarte mare, necesară pentru amorsarea arcului.

Utilizarea bobinelor pentru stabilizarea arcului în loc de rezistențe are avantajul că mărește randamentul circuitului. Se întrebuită în general grupuri de 30 V și 40 A.

167. Sudarea cu arc. Se utilizează redresoare în punte trifazată (v. fig. 304). Este necesar ca acest circuit să aibă o tensiune mare la mers în gol și o limitare a curentilor de scurtcircuit. Acest lucru se realizează printr-un larg domeniu de reglaj continuu la transformatorul care alimentează redresorul. Se utilizează curent grupuri de 180 A și 25 V.

168. Alimentarea centralelor telefonice. În locul bateriilor de acumulație se utilizează montaje monofazate în punte.

Pentru menținerea tensiunii constante la variații de sarcină, schema conține un transformator la care miezul lucrează în regiunea de saturație. Pentru micșorarea factorului de formă, se utilizează circuite secundare pentru reducerea armonicilor. Se construiesc de obicei grupuri de 4×60 V și 4 A. Circuitul unui asemenea grup se vede în fig. 305.

169. Alimentarea emițătoarelor radio de mică putere. Se utilizează montajul din fig. 306, pentru furnizarea unor tensiuni anodice până la 5 000 V. Redresorul are o rezistență internă foarte mică. Uneori se construiesc un redresor unic pentru încălzirea filamentelor, pentru tensiunea de grilă și pentru tensiunea anodică. Grupurile obișnuite sînt de 350 V și 0,1 A sau 650 V și 0,4 A sau 2 000 V și 0,5 A.

170. Încălzirea tuburilor electronice ale posturilor de emisie de putere mare. Se folosește montajul din fig. 307. La încălzirea tuburilor de emisie, extracurentul de închidere al circuitului de alimentare al filamentului trebuie să fie limitat. Pentru aceasta, se utilizează pe primarul transformatorului care alimentează redresorul bobine de reacțanță, premagnetizate. Armonicile rezultate din redresare se elimină cu un filtru (inductanță-capacitate).

Se poate merge până la grupuri de 5 000 A; grupurile redresoare obișnuite sînt de 135 A și 20 V, 65 A și 20 V.

171. Alimentarea băilor de electroliză. Se obțin cu redresoare uscate; curenți de la 20 A până la 30 000 A, sub tensiuni de la 2 până la 12 V.

Pentru sarcini mici, până la 100 A, se folosesc redresoare de mare suprafață, cu răcire naturală.

La tensiuni joase, până la 3 V, se folosește montajul hexafazat cu secundarul dublu-stea avînd punctele neutre legate printr-o bobină de absorbție (v. fig. 308a). Pentru tensiuni mai mari, se utilizează montajul trifazat în punte, al lui Larionov (fig. 309b).

Tensiunea se reglează în trepte pe înfășurarea primară a transformatorului. Montajul din fig. 308b prezintă avantajul că pe partea curentului redresat se dispune de două permițînd alimentarea de băi electrolitice diferite.

172. Alimentarea aparatelor Roentgen medice. În aparatele Roentgen s-au utilizat redresoare uscate cu răcire forțată pentru tensiuni până la 400 kV. Mai multe elemente legate în serie sînt montate în coloane de 30 cm lungime și mai multe coloane similare se așază într-o baie de ulei. Dimensiunile unui redresor de 400 000 V pot fi de 50/50/50 cm.

173. Autoexcitarea mașinilor sincrone. În locul unei surse separate pentru alimentarea circuitului de excitație se folosesc redresoare uscate montate ca în fig. 309.

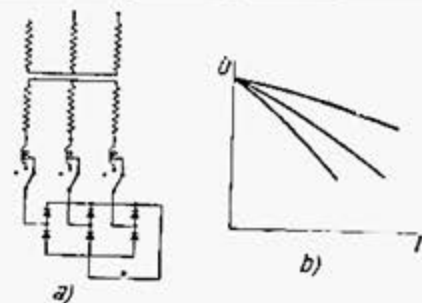


Fig. 303. — Schema de montaj (a) și caracteristica circuitului cu redresoare uscate (b), utilizată la alimentarea lămpilor cu arc.

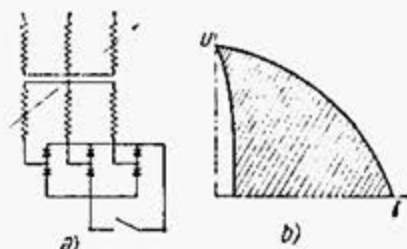


Fig. 304. — Schema de montaj (a) și caracteristica circuitului (b), la sudarea cu arc.

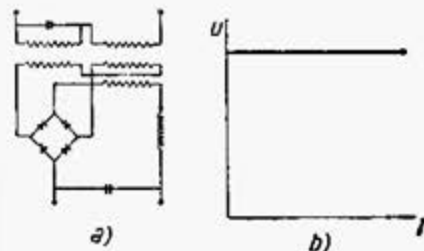


Fig. 305. — Schema de montaj (a) și caracteristica circuitului cu redresoare uscate (b) pentru alimentarea centrelor telefonice.

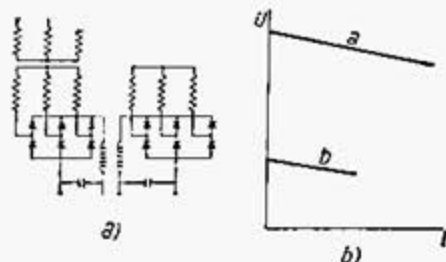


Fig. 306. — Schema de montaj (a) și caracteristica circuitului cu redresoare uscate (b), folosit la alimentarea radio-emitoarelor de putere mică.

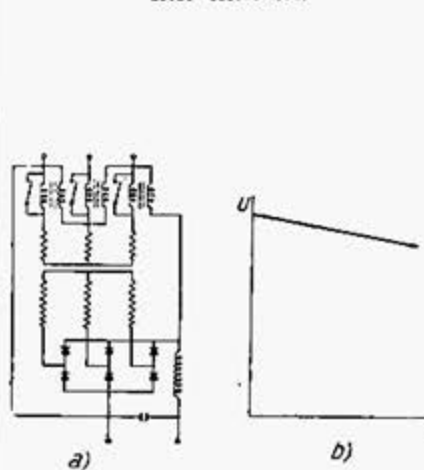


Fig. 307. — Schema de montaj și caracteristica circuitului cu redresoare uscate folosit la încălzirea filamentelor posturilor de radio-emisie de mare putere.

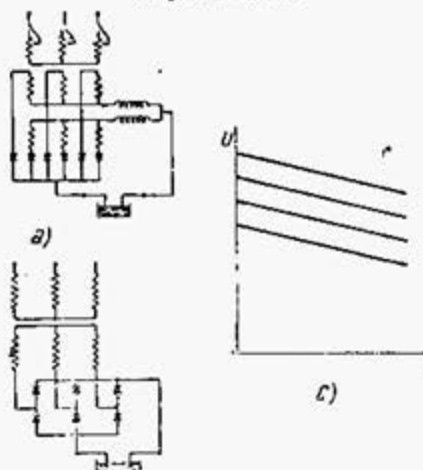


Fig. 308. — Schemele de montaj și caracteristica circuitelor cu redresoare uscate folosite pentru electroliză.

174. Alimentarea motoarelor de curent continuu de la rețele de curent alternativ. Se poate face prin intermediul redresoarelor uscate conform schemei din fig. 310 în cazul puterilor mici.

175. Diverse alte aplicații. Redresoarele uscate sunt folosite în diferite scheme de control, în scheme de măsurat mărimi în curent alternativ cu ajutorul

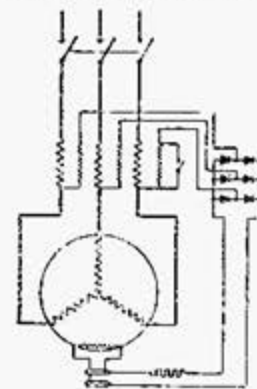


Fig. 309. — Schema unui generator de curent alternativ cu auto-excitare.

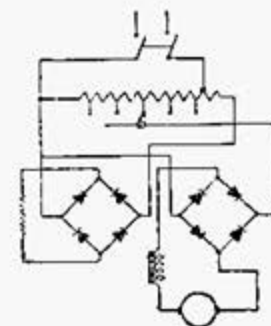


Fig. 310. — Schema alimentării motoarelor de curent continuu prin circuite cu redresoare uscate.

aparatorilor cu magnet permanent etc. De curind ele sunt utilizate și în locul tuburilor redresoare cu catod cald în generatoarele de foarte mare tensiune, în cascadă.

O. Redresorul cu contacte comandate

176. Principiul de funcționare. Redresorul cu contacte comandate este cunoscut de mai mult timp, dar utilizarea lui industrială este de dată foarte recentă și anume de când a putut fi perfecționat astfel, încât funcționarea lui și în special comutația să se facă în bune condiții.

Redresorul cu contacte comandate funcționează pe principiul supapei ca și redresorul cu mercur, dar închiderea și deschiderea supapei se face prin acționare pe cale mecanică în sincronism cu variația alternativă a tensiunii. Principiul său de funcționare este următorul:

În circuitul secundar al unui transformator legat în stea (fig. 311) sunt montate trei contacte k_1 , k_2 , k_3 , care sub acțiunea unui arbore cu came antrenat de un motor sincron M , închid și deschid în mod succesiv aceste contacte stabilind legătura când valoarea tensiunii este pozitivă, între cele trei faze ale transformatorului și între borna + a circuitului de curent continuu; borna - este constituită din punctul neutru al montajului în stea ca și la un redresor trifazat cu mercur.

Pentru ca funcționarea să se facă în bune condiții, trebuie ca închiderea fiecărui contact să se facă întotdeauna în momentul precis în care tensiunea fazei intercalată în circuit este egală cu aceea a fazei care urmează să fie conectată (fig. 312a). Cum contactele nu trebuie să se desfacă atunci când sunt traversate de curent, trebuie ca un contact, spre exemplu contactul k_1 , să se deschidă numai după ce contactul k_2 s-a închis.

În timpul foarte scurt cînd contactele k_1 și k_2 sînt simultan închise, între fazele 1 și 2 circulă un curent de scurtcircuit i_c (fig. 312b) care trece prin contactul k_2 în sens invers decît curentul continuu I_d furnizat de redresor. Valoarea instantanee

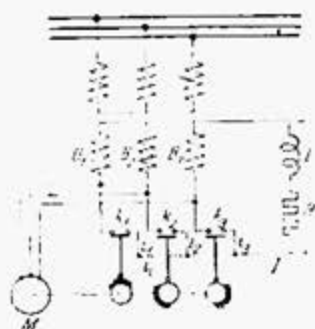


Fig. 311. — Schema electrică a unui redresor trifazat cu contacte comandate:

B_1, B_2, B_3 — bobinajele celor trei faze secundare ale transformatorului; k_1, k_2, k_3 — contactele redresorului; M — motorul sincron de comandă al contactelor; i_1, i_2, i_3 — curenții în cele trei faze; i_c — curentul de scurtcircuit; I_d — curentul continuu; R — rezistența circuitului de utilizare; L — inductanța de scăpări a circuitului.

a acestui curent de scurtcircuit este dată de raportul dintre diferența tensiunilor acestor două faze și inductanța de scăpări a circuitului. În momentul în care curentul i_c devine egal cu curentul continuu I_d , curentul de contact, rezultat, devine nul și contactul poate fi întrerupt fără curent.

Pentru a se putea deschide contactele întotdeauna exact în momentul trecerii prin zero a curentului de contact, ar trebui realizată în mod automat o precizie de funcționare care depășește posibilitățile practice. Pentru a se înlesni comutația, se montează în serie cu contactele niște bobine de inductanță care au fierul saturat chiar pentru un curent foarte redus și al căror ciclu de histeresis are o formă aproape rectangulară. Pentru valorile nominale ale curentului, bobina are o impedanță redusă. Atunci cînd curentul trece prin zero, inductanța crește brusc și curentul este menținut la o valoare redusă pînă cînd magnetizarea se inversează. În timpul acestei perioade de curent redus, contactul se poate deschide practic fără curent.

Tensiunea redresată este egală cu tensiunea față de punctul neutru (polul negativ) a fiecărei faze a transformatorului în momentul cînd aceasta este legată cu polul pozitiv.

În timpul t_k corespunzînd unghiului γ cît durează suprapunerea a două contacte succesive, fazele corespunzătoare sînt legate simultan la polul pozitiv astfel încît în acest timp tensiunea continuă este egală cu tensiunea rezultantă a celor două faze, adică cu tensiunea dată de sinusoida u_{12} (fig. 312 a).

Tensiunea continuă obținută în această perioadă este redusă față de tensiunea fazei corespunzătoare cu cantitatea Δu_L , reprezentînd căderea de tensiune.

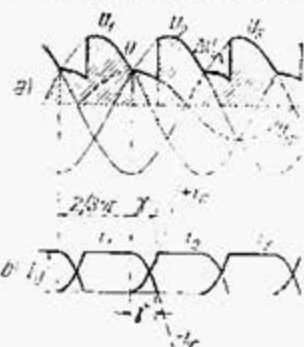


Fig. 312. — Diagrama tensiunilor și curenților redresorului cu contacte:

a — diagrama tensiunilor redresate; b — diagrama curenților; u_1, u_2, u_3 — curbele tensiunilor trifazate; u_{12} — tensiunea rezultantă; u — tensiunea medie redresată; Δu_L — căderea de tensiune inductivă în perioada suprapunerii contactelor; γ — unghiul de suprapunere a contactelor; i_1, i_2, i_3 — curbele curenților trifazați; i_c și i_C — curenții de scurtcircuit în momentul suprapunerii contactelor; I_d — curentul continuu.

177. **Reglajul tensiunii.** Tensiunea continuă a unui redresor cu contacte comandate poate fi reglată prin decalarea cu un unghi α , denumit *unghi de comandă*, a poziției în care se începe suprapunerea contactelor. Valoarea medie a tensiunii continue se reduce atunci cu valoarea suprafeței hașurate, corespunzînd scăderii de tensiune Δu_x (fig. 313).

Acest reglaj de tensiune se realizează de preferință pe cale electrică printr-o decalare a axei magnetice a rotorului motorului sincron M . Bobinajul de excitație al acestui rotor nu este un bobinaj inductor obișnuit. El este identic cu bobinajul în stea al unui rotor de motor asincron funcționînd sincronizat, adică intrarea curentului continuu de excitație se face printr-una din ramurile stelei și ieșirea prin celelalte două ramuri montate în paralel avînd fiecare în serie o rezistență reglabilă (fig. 314).

Prin reglajul simultan în sens invers al acestor două rezistențe conjugate se poate varia curentul în cele două ramuri ale stelei menținîndu-se

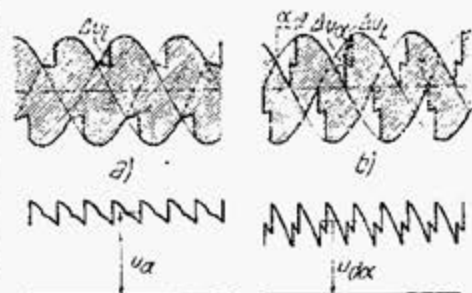


Fig. 313. — Diagrama reglajului de tensiune: a — funcționarea cu tensiunea maximă; b — funcționarea cu tensiune redusă; u_{dx} — tensiunea medie redresată; Δu_L — căderea de tensiune inductivă; u_{dx} — tensiunea continuă redusă prin unghiul de comandă α ; Δu_α — reducerea de tensiune prin reglaj.

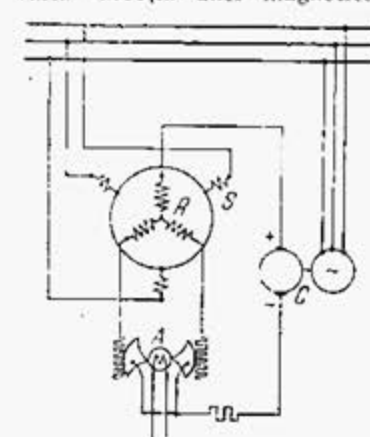


Fig. 314. — Schema electrică a motorului sincron cu reglaj automat al tensiunii:

S — stator; R — rotor; C — grup convertitor de excitație; A — regulator de tensiune cu acționare rapidă.

intermediul unei bobine de absorbție. Prin acest montaj se obține aceeași valoare pentru tensiune ca și în montajul trifazat în stea dar un curent dublu.

179. **Rezultate de exploatare.** Redresoarele cu contacte comandate sînt destinate a fi folosite pentru instalațiile de transformare a curentului alternativ

rotorului menținîndu-se valoarea cîmpului constantă. Reglajul poate fi comandat, fie manual, fie automat printr-un regulator de tensiune de construcție normală.

178. **Montajele redresoarelor cu contacte.**

În practică, în vederea unei mai bune utilizări a bobinajelor transformatorului și a obținerii unei curbe de tensiune mai constante, în locul montajului trifazat cu punct neutru se întrebuițează conexiunile hexafazate reprezentate în fig. 315a și 315b și uneori conexiuni dodecafazate. Conexiunea din fig. 315a (conexiunea Larionov) rezultă din asocierea a două redresoare trifazate montate în serie în opoziție de fază (defazăj de 180°). Contactele care sînt închise în timpul semiperioadei pozitive formează polul pozitiv, iar contactele care sînt închise în timpul semiperioadei negative formează polul negativ.

În consecință, tensiunea obținută este de două ori mai mare decît în cazul montajului trifazat în stea cu punct neutru corespunzător.

În montajul din fig. 315b (montajul cu bobină de absorbție) două sisteme trifazate defazate cu 180° sînt legate în paralel prin intermediul unei bobine de absorbție. Prin acest montaj se obține aceeași valoare pentru tensiune ca și în montajul trifazat în stea dar un curent dublu.

trifazat în curent continuu având tensiuni între 50 V și 400 V pentru intensități foarte mari între 5 000 A și 15 000 A. Pentru aceste aplicații redresoarele cu contacte comandate prezintă un mare avantaj în ce privește pierderile mai reduse și respectiv randamentul mai ridicat atât față de convertizoarele rotative de tipul motor-generator cât și față de redresoarele cu mercur, după cum se poate vedea din curbele reprezentate în fig. 316, 317 și 318.

Pentru tensiuni sub 150 V și în special pentru curenți foarte mari între 8 000 A și 16 000 A se în-

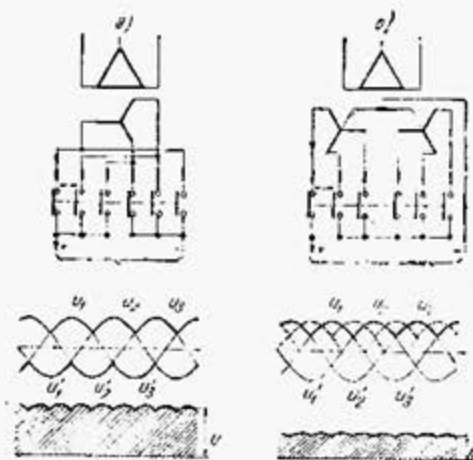


Fig. 315. — Scheme de montaj și diagramele tensiunilor pentru redresoare hexafazate:

a — conexiunea Larișov; b — conexiunea dublu-trifazată cu egalizor de fază; u — tensiunea medie redresată; u_1, u_2, u_3 — tensiunile trifazate directe; u', u', u' — tensiunile trifazate în opoziție de fază.

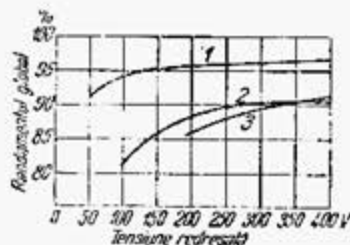


Fig. 317. — Randamentul global al diferitelor sisteme de convertizoare pentru un curent nominal de 10 000 A în funcție de tensiunea nominală:

1 — redresor cu contacte; 2 — convertizor motor-generator; 3 — redresor cu mercur.

trebuie să se facă conexiunea cu egalizor de fază, reprezentată în fig. 315 b.

Redresoarele cu contacte comandate pot funcționa în bune condiții în paralel atât între ele cât și cu celelalte tipuri de convertizoare: redresoare cu mercur sau convertizoare rotative. Modul lor de comportare în exploatare este perfect asemănător cu acela al redresoarelor cu mercur, cu care au o mare asemănare din punctul de vedere al principiului de funcționare.

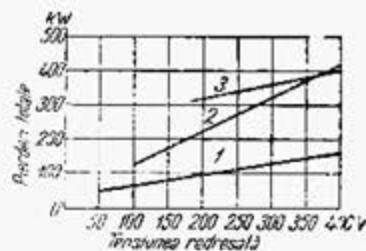


Fig. 316. — Pierderile totale pentru diferite sisteme de convertizoare pentru un curent nominal de 10 000 A în funcție de tensiunea nominală:

1 — redresor cu contacte; 2 — convertizor motor-generator; 3 — redresor cu mercur.

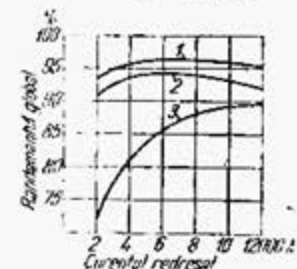


Fig. 318. — Randamentul global al unei instalații de electroliză pentru un curent nominal de 10 000 A și o tensiune continuă de la 140 V la 250 V în funcție de sarcină:

1 — redresor cu contacte de 250 V; 2 — redresor cu contacte de 140 V; 3 — convertizor motor-generator de 250 V.

ANEXĂ

SEMNE CONVENȚIONALE PENTRU REDRESOARE, ONDULOARE, PILE ȘI ACUMULATOARE (DUPĂ STAS 2797-54; REPRODUCERE CU CARACTER INFORMATIV).

1. Generalități

1. Semnele convenționale privind redresoarele, onduloarele, pilele și acumuloarele sînt pentru reprezentări unifilare sau multifilare. La cele unifilare, conductorii de polaritate sau faze diferite aparținînd aceluiași circuit sînt reprezentați printr-o singură linie. Numărul conductorilor din acel circuit se indică printr-un număr corespunzător de linii scurte care întretaie oblic linia circuitului. Dacă acest număr este mai mare de 4, atunci se trasează o singură liniuță oblică, lângă care se scrie numărul conductorilor respectivi. La semnele multifilare fiecare conductor de polaritate sau fază diferită este reprezentat prin cîte o linie.

2. Datele caracteristice ale redresoarelor și onduloarelor se scriu în interiorul și în exteriorul semnului convențional respectiv, după cum urmează:

a) în interiorul semnului tubului la partea superioară: numărul anozilor normal de semn convențional al felului curentului anodic și de frecvența lui;

b) în exteriorul semnului tubului:

— la dreapta sus, tensiunea alternativă (eficace), în V;

— jos tensiunea continuă, în V;

— la stînga: puterea, în kW, în curent continuu și puterea, în kVA, în curent alternativ.

3. Dacă semnul convențional nu reprezintă și tubul sau carcasa redresorului sau onduloarelor datele de la punctul 2 a se scriu în dreptul conductorilor, respectiv în exteriorul semnului (exemplele 23...25).

Sensul în care se transmite energia electrică se reprezintă printr-o săgeată trasată în exteriorul semnului (exemplele 23...25).

4. În reprezentările bateriilor de pile și acumuloare cu mai mult de 6 elemente se figurează numai cîte unul sau două din primele și ultimele elemente, restul indicîndu-se cu o linie întreruptă, iar numărul de elemente și caracteristicile lor se scriu alături (exemplele 31 și 32).

5. Semnele convenționale pot fi, la nevoie, desenate și în alte poziții decît cele indicate în tabelele din prezentul standard.

6. În general, bornele nu se reprezintă. La nevoie se poate folosi semnul de la nr. 38, STAS 1590-50. Numerotarea lor, cînd este necesară, se face cu cifre arabe.

7. Punctul care indică prezența gazului rarefiat sau a vaporilor într-un tub se figurează într-un loc liber al tubului (semnul 2).

11. Semne convenționale

A. Redresoare și onduloare

8. Elemente de construcție ale redresoarelor și onduloarelor cu vid, gaze sau vapori.

Tabelul 1

Nr.	Denumire	Semn convențional
1	Tub cu vid — în general	
2	Tub cu gaz rarefiat sau vapori — în general	
3	Catod — în general	
4	Catod reșe	
5	Catod incandescent cu încălzire directă sau filament de încălzire	
6	Catod incandescent cu încălzire indirectă	
7	Catod cu mercur	
8	Anod — în general	

Tabelul 1 (continuare)

Nr.	Denumire	Semn convențional
9	Anod de excitare	
10	Anod de aprindere	
11	Anod de aprindere la fiecare perioadă	
12	Grilă (grătar) — în general	

9. Aparate și montaje.

Tabelul 2
a) Aparatură

Nr.	Denumire	Semn convențional
13	Redresor sau ondulator — în general	
14	Redresor uscat	
15	Redresor electrolitic	

Tabelă 2 (continuare)

Nr.	Denumire	Semn convențional	
		monofilar	multifilar
16	Redresor cu onduiuri în vid, cuze sau vapori		
17	Redresor cu helarii		
18	Redresor cu vapori de mercur cu catod lichid		
19	Redresor cu vapori de mercur cu catod incandescent		

10. Montaje

Nr.	Denumire	Semn convențional	
		monofilar	multifilar
20	Montaj în punte pentru redresarea amelor alternanțe în curent monofazat		

Tabelă 2 (continuare)

21	Montaj pentru redresarea amelor alternanțe în curent trifazat		
22	Montaj cu pînă și neutru la secundarul transformatorului pentru redresarea unei singure alternanțe în curent alternativ trifazat		

10. Exemple de reprezentare a redresoarelor și ondulatoriilor.

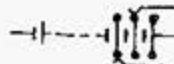
Tabelă 3

Nr.	Denumire	Semn convențional	
		monofilar	multifilar
23	Redresor alimentat în curent alternativ hexafazat 500 V, 50 Hz și în curent continuu de 800 V		
24	Redresor cu vapori de mercur și catod lichid cu 3 anodi și 3 grile		
25	Onduitor cu vapori de mercur și catod lichid cu 6 anodi, 6 grile, 2 anodi de excitație, 1 anod de aprindere, 300 kVA, din curent continuu 500 V în curent alternativ hexafazat 740 V 50 Hz cu fir neutru		

B. Pile și acumulatoare

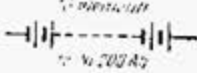
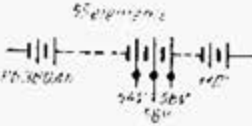
11. Pile de acumulare.

Tabela 4

Nr.	Denumire	Schema convențională
26	Element de pilă sau acumulator <i>Observație.</i> Linia lungă (scurtă) reprezintă polul pozitiv.	
27	Baterie de pile sau acumulatoare	
28	Baterie de pile sau acumulatoare având prize intermediare de tensiune	
29	Baterie de acumulatoare cu reductor simplu	
30	Baterie de acumulatoare cu reductor dublu	

12. Exemple de reprezentare a pilelor și a acumulateorilor.

Tabela 5

Nr.	Denumire	Schema convențională
31	Baterie de acumulatoare Fe-Ni, 10 elemente cu o capacitate de 200 Ah fiecare	
32	Baterie de acumulatoare cu plăci de plumb: 55 elemente cu o capacitate de 300 Ah fiecare, 110 V tensiune totală, 3 prize intermediare de tensiune 55 V, 56 V și 58 V	

BIBLIOGRAFIE

Pile și acumulatoare

- G. V. Akinov — Teoria i metodii issledovaniia korozii metalov, Moskva, Izd. Akademii Nauk SSSR, 1945.
- Al. Buttner — Die Beleuchtung von Eisenbahn Persamenwagen, Berlin, Springer Verlag, 1912.
- Lu. M. Kaganovici — Elektrovoznie akkumulatortie baterii, Moskva, Ugletekhizdat, 1930.
- M. H. Karapetian — Termodinamien chimie (trad. din 1. rusă) Ed. Tehnică, București, 1953.
- V. A. Kireev — Kurs fiziceskoj himii, Moskva, Goshimizdat, 1951.
- Crenell and Lea — Manganese Accumulators, New-York, Longmans Green, 1928.
- G. K. Dautian — Problema neposredstvennogo prevraschenia himiceskoj energii topliva v elektriceskuiu, Moskva, Izd. Akademii Nauk SSSR, 1947.
- G. Droschmann u. P. Moll — Fabrikation von Batterien und Akkumulatoren, Berlin, Springer Verlag, 1941.
- G. Droschmann — Moderne Primärbatterien, Berlin, N. Branz, 1951.
- G. Droschmann — Bleiakumulatoren, Wienheim, Verlag Chemie, 1951.
- G. Ferry — L'Electricien, 80, Paris (1917), 12 (1918); Comptes rendus 172, Paris 1920.
- L. A. Fihman — Problema producerii pe scară mare a energiei electrice pe cale electrochimică, Electricitatea 1-2, (1952) București.
- L. A. Fihman — Pile de combustie, Electricitatea 4-5, 1952.
- L. A. Fihman — Pila cu clorură de argint Studii și cercetări de fizică, IV, 1-2 (1953), București.

- A. N. Franklin — Kinetika elektrodni protosov, Moskva, Izd. Moskovskogo Universiteta, 1952.
- B. A. Ghreikoe i dr. — Proizvodstvo svintovih akumulatortov, Moskva, Gosenergoizdat, 1947.
- S. Glasstone — An introduction to electrochemistry (traducere în 1. rusă: Vvedenie v elektrohimiю, Moskva, Izd. Inostranoi Literaturi, 1951).
- K. I. Grachev — Seleciiie akkumulatortov, Moskva, Gosenergoizdat, 1951.
- V. G. Hontakov i dr. — Tehnologhia elektrohimiceskikh proizvodstv, Moskva, Goshimizdat, 1949.
- G. Leclanché — Pile au peroxyde de manganèse à un seul liquide Les Mondes, 16, Paris 1868. Comptes rendus 83, Paris 1876.
- J. Leclanché — L'electrochimie et l'electrometallurgie, Paris Dunod 1947.
- P. J. Moll — Die Fabrikation von Bleiakumulatoren, Leipzig Akademischer Verlag, 1952.
- A. P. Okadov — Himiceskie istočniki toka, Moskva, Goshimizdat, 1948.
- V. G. Socevanov — Galvaniceskie elementy, Gosenergoizdat, Moskva, 1951.
- P. I. Ustinov — Akkumulatortie baterii, Moskva, Gosenergoizdat, 1952.
- A. A. Vasilenko — Bateriile de acumulatoare sistemele energetice, București, Ed. Energetică 1952.
- N. Vasilescu-Karpen — Pila electrică cu clorură de argint, Electricitatea, 7, București, 1952.
- G. W. Vinal — Primary Batteries, New-York, John Wiley & Sons, 1950.
- G. W. Vinal — Storage Batteries, New-York, John Wiley & Sons, 1940.

- S. A. Volokonski — Radiionaja elektrovoz-
naja luga, Moskva, Ugletekhizdat,
1950.
J. L. Woodbridge — Storage Battery Charging,
Electrical Engineering, 54 (V) New-
York, 1935.

Mutatoare

- A. I. E. E., Committee Report — Mercury
Arc Power Converters in North
America, A.I.E.E. Trans. 67, 1948,
Part. II, 1031-1059.
A.I.E.E., Committee Report — Water Cooling
Systems of Mercury-Arc Rectifiers,
A.I.E.E. Trans. 72, 1953, 465-475.
K. G. Blanter — Elektriceskoe oborudovanie
teagovih podstantij, Izd. MKH (SPSR)
1948.
Brattain — Co-O Current Creep, Bell Tel.
Res. 19, 153, 1941.
D. H. Brown and J. J. Smith — Current
and Voltage Wave Shape of Mercury
Arc Rectifiers, A.I.E.E. Trans. 52,
1933, 973-986.
F. I. Bulacu, E. L. Ellingher, G. S. Pandișev
— Regularea și electroprivod supra-
veșterii vîșșimilecilor, G.E.L.
1940.
I. L. Kaganov — Mutatori electronici și
ionici (traducere din limba rusă),
București, Editura Energetică de
Stat, 1953.
J. D. Cobine — Gaseous Conductors, New
York, Mc Graw-Hill, 1941.
K. T. Compton — On the Theory of the
Mercury Arc, Phys. Rev. 37, 1931,
1077-1090.
M. P. Kostenko, L. P. Neiman, G. N. Bhostr-
bici — Elektromagnitnaja protse-
ssionnaja sistemnaja vîșșimilecilor
ustanovka, Izd. AN SSSR, 1946.
F. W. Cramer, L. W. Morton, A. G. Darling
— The Electronic Converter for Ex-
change of Power, A.I.E.E. Trans. 63,
(1944), 1059-1069.
S. B. Cragg, R. M. Easelen — Characteristics,
Application and Economics of Fre-
quency Changers — A.I.E.E. Trans.
64, (1945), 351-358.
W. G. Dow — Fundamentals of Engineering
Electronics, New-York, John Wiley
& Sons, 1937.
D. H. French — Operating Characteristics of
Small Grid-Controlled Hot-Cathode
Arcs or Thyratrons, J.F.I., 221,
(1936), 83-102.
L. H. Germer — The Distribution of the
Initial Velocities among Thermionic
Electrons, Phys. Rev. 25, (1925),
795-807.
A. Glaser und K. Müller-Lübeck — Ein-
führung in die Theorie der Strom-
richter, Band 1: Elektrotechnische
Grundlagen, Berlin, Julius Springer,
1935.
A. A. Glazunov (redakția) — Elektriceskie
stanții i podstantii, G. E. J., 1941.
Glaser i Müller-Lübeck — Teoria elektronii
i ionii preobrazovatelei toka, Trans-
tehnizdat, 1948.
A. L. Gorelik — Promislenaja Elektronika,
Gosenergoizdat, 1951.
J. Gunter-Schulze — Elektrische Gleichrichter
und Ventile, Berlin, Julius Springer,
1929.
H. K. Henisch — Metal Rectifiers — Oxford
Clarendon Press, 1949.
G. G. Herskind — Basis for Dielectric Tests
for Rectifier Equipment, A.I.E.E. Trans.
70, (1951), Part. II, 1930-1933.
G. G. Herskind, E. J. Henschel — Perfor-
mance of Pumped Ignitron Recti-
fiers, A.I.E.E. Trans. 67 (1948),
215-218.
A. W. Hull — Gas-Filled Thermionic Tubes,
A.I.E.E. Trans. 17 (1928), 736-763.
A. W. Hull — Hot-Cathode Thyratrons, G.E.
Rev., 32 (1929), 213-223, 390-399.
A. W. Hull and H. D. Brown — Mercury-Arc
Rectifier Research, A.I.E.E. Trans.
50 (1931), 744-756.
A. W. Hull — Characteristics and Functions
of Thyratrons, Physics, 4, 1923, 71.
H. S. Ingram — Cold-Cathode Gas-Filled
Tubes as Circuit Elements A.I.E.E.
Trans., 58 (1939), 342-346.

- Ioffe — Schottky's Theories of Dry Solid
Rectifiers, Electr. Communication, 22,
217 (1945).
Ioffe — Electrical Resistance of a Contact
between a Semiconductor and a
Metal — J. Phys. U.S.S.R., 10, 19
(1946).
A. F. Ioffe — Poluprovodniki — Elektrices-
tvo nr. 1, 1946.
J. B. W. Jolley — Alternating-Current Recti-
fication and Allied Problems, New-
York, John Wiley & Sons, 1928.
O. Kilitz — Transformers with Peaked Wa-
ves, E.E. 51 (1932), 802-804.
H. Klemperer — Dielectric Igniters for Mer-
cury-Pool-Cathode Tubes, Electron-
ics, 14 (November, 1941), 38-41.
Komar — Karakteristiki selenih vîșșimile-
cilor, J.T.F., 10, 1897 (1940).
M. P. Kostov, I. I. Soloviov, A. M. Fedoseev
— Osnovi tehniki releinoi zasliti,
G.E.L., 1944.
S. E. Lamar and K. T. Compton — Poten-
tial Drop and Ionisation at Mercury
Cathode, Phys. Rev. 37 (1951),
1069-1076.
J. P. Loomy — Thermionic Cathodes for
Gas-Filled Tubes, Electronics, 6 (Oc-
tober, 1933), 280-281.
J. Langmuir — Electric Discharges in Gases
at Low Pressures, J.F.I. 211 (1932),
284-285.
L. B. Loeb — Fundamental Processes of
Electrical Discharges in Gases, New-
York, John Wiley & Sons, 1939.
K. O. Marti and N. Winograd — Mercury-
Arc Rectifiers, Theory and Practice,
New York, Mc Graw-Hill, 1939.
J. Marx — Lichtbogen-Stromrichter für sehr
hohe Spannungen und Leistungen,
Berlin, Julius Springer, 1932.
Metallischeske rucine vîșșimilecilor, izgo-
tavlennaja zavodom, Uralskoelektr-
oparat MEPS SSSR, Tehniceskii spr-
avochnik, G.E.L., 1951.
M. M. Morack — Voltage Impulses for
Thyatron Grid Control, G.E. Rev.
37 (1934), 288-295.
L. W. Morton and D. I. Bohn — Load Pick-
up by a Group of Ignitron Rectifiers,
A. I. E. E. Trans., 62 (1943) 679-684.
K. Müller-Lübeck — Der Quecksilberdampf-
gleichrichter, Band 1: Theoretische
Grundlagen, Band II: Konstruktive
Grundlagen, Berlin, Julius Springer,
1929.
A. C. Myers — Excitation Circuits for
Ignitron Rectifiers, A. I. E. E. Trans.
60 (1941), 943-948.
S. J. Pap, J. K. Billard, R. C. Marcus,
— Load-Dropping Tests on a Large
Ignitron Rectifier Installation, A.I.E.E.
Trans. 72 (1953) Part. I, 164-175.
D. C. Prince and F. B. Vogles — Principles
of Mercury-Arc Rectifiers and their
Circuits, New-York, Mc Graw-Hill,
1927.
H. J. Reich — Theory and Application of
Electron Tubes, New-York, Mc Graw-
Hill, 1939.
H. Rissik — Mercury Arc Current Converters
London, Sir Isaac Pitman & Sons,
Ltd, 1947.
G. A. Rikhiu — Instalati de mutatori de mare
putere (traducere din limba rusă),
Editura Energetică de Stat, 1951.
J. B. Ryder — Electronic Engineering Princi-
ples, New-York, Prentice Hall, 1949.
Schottky — Die Sperrschichten, Schweizer
Archiv. 82, 7 (1941).
Seltz — Modern Theory of Solids, New-York,
Mc Graw-Hill Book Co, 1940.
Spence — Elektronische Halbleiter, Berlin,
Springer Verlag 1955.
J. Slepian and L. B. Loeb — A New Method
for Initiating the Cathode of an
Arc, A.I.E.E. Trans. 52 (1933) 693-700.
E. E. Staff M. I. T. — Magnetic Circuits and
Transformers, New-York, John Wiley
& Sons, 1943.
E. E. Staff M. I. T. — Applied Electronics,
New-York, John Wiley & Sons, 1947.
H. C. Steiner, A. C. Gable and H. Z. Maser,
Engineering Features of Gas-Filled
Tubes, E. E., 51 (1932).
V. Šilling — Šemi vîșșimilecilor, invertorov
i preobrazovatelei ccaustotij (pred.) G.
E. L., 1950.
B. P. Terentiev — Alimentarea cu energie
electrică a instalațiilor de radio
(traducere din limba rusă), București,
Editura Energetică de Stat, 1953.
I. G. Tolstov — Kontaktnie preobrazovatelei
Izd. AN SSSR, 1953.
F. N. Tompkins — The Parallel Type on In-
verter E. E., 52 (1933) 253-256.

- Turegg and Whitmer*—Crystal Rectifiers, McGraw-Hill Book Co., New-York, 1951.
- M. A. Townsend*—Cathode Spot Initiation on a Mercury Pool by Means of an External Grid, *J. App. Phys.*, 12 (1941), 209—215.
- F. C. Wagner*—Parallel Inverter with Resistance Load, *E. E.*, 54 (1935), 1227—1235.
- Westinghouse Electric Corporation, Industrial Electronics Reference Book, New-York, John Wiley & Sons, 1948.
- C. H. Willis and C. C. Herskind*—Rectifier Terminology and Circuits Analysis, *A. I. E. E. Trans.*, 61 (1942), 496—498.
- H. Winograd*—Development of Excitron-Type Rectifiers, *A.I.E.E. Trans.*, 63 (1944), 969—978.
- H. Winograd*—Electronic Frequency Converter Used as Nonsynchronous Tie between A. C. Power Stations, *A. I. E. E. Trans.*, 72 (1953) Part. 1, 263—273.
- R. C. Witzke, J. V. Kresser, J. E. Dillard*—Voltage Regulation of 12-Phase Double-Way Rectifiers, *A.I.E.E. Trans.*, 72 (1953) Part. 1, 689—697.
- R. L. Witzke, V. J. Kresser, J. E. Dillard*—Influence of A. C. Reactance on Voltage Regulation of 6-Phase Rectifiers, *A.I.E.E. Trans.*, 72 (1953) Part. 1, 244—252.
- Pravila ustroistva elektrotehniceskikh ustano-
vok, G.E.I., 1949.

ERATA

Pag.	Rînd	În loc de	Se va citi	Din vina
12	4 de sus	$1 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$	$1 \cdot 10^{-5} \text{ V/C}$	Editurii
69	22 de sus	$100 \int_0^{t_d} I_d \cdot t_d$	$100 \int_0^{t_d} I_d \cdot dt_d$	
		$\int_0^{t_d} I_i \cdot t_i$	$\int_0^{t_i} I_i \cdot dt_i$	
69	3 de jos	$100 \int_0^{t_d} I_d \cdot U_d \cdot t_d$	$100 \int_0^{t_d} I_d \cdot U_d \cdot dt_d$	
		$\int_0^{t_i} I_i \cdot U_i \cdot dt_i$	$\int_0^{t_i} I_i \cdot U_i \cdot dt_i$	
113	Tabela 41 coloana 2 I rînd 13	100	10	
114	Tabela 42 coloana 5 rînd 4 de jos	185	175	Tipografiei
133	Legenda fig. 14	în argon	în mercur	Editurii
192	9 de sus	$\Delta U_n \approx 2 \Delta U_n$	$\Delta U_n' \approx 2 \Delta U_n$	Tipografiei
212	formula 50.29	$\frac{4}{3\pi} \cos \omega t$	$\frac{1}{3\pi} \cos 2\omega t$	Editurii
246	formula 56.2	$i_a = i_2 = \frac{nR}{R_s}$	$i_a = i_2 = \frac{n - E}{R_s}$	
261	formula 58.25	U	$U_d \approx$	Tipografiei
277	formula 65.2	$\frac{n}{n - \varphi}$	$i_a \approx$	
375	formula 124.10	$D = \sqrt{\sum U_m^2 I_n^2 + U_n^2 I_m^2 - 2 U_m I_m I_n \cos(\varphi_m - \varphi_n)}$	$D = \sqrt{\sum [U_m^2 I_n^2 + U_n^2 I_m^2 - 2 U_m U_n I_m I_n \cos(\varphi_m - \varphi_n)]}$	
129	5 de sus	curentul este apare	curentul invers apare	Editurii